



OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM PARA DEPOSIÇÃO DE REVESTIMENTO DURO DE LIGA FECRC-NB POR FCAW

Elder Douglas dos Santos¹

Jolvani José Dalponte²

Fernando Henrique Gruber Colaço³

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo otimizar os parâmetros de soldagem para a deposição de revestimento duro da liga FeCrC-Nb utilizando o processo FCAW (Flux-Cored Arc Welding). A liga FeCrC-Nb é amplamente utilizada em aplicações que demandam alta resistência ao desgaste e proteção contra abrasão. A eficácia do revestimento, no entanto, depende diretamente dos parâmetros de soldagem aplicados, como corrente, tensão e velocidade de soldagem. Este estudo busca identificar condições que minimizem a diluição, preservando a composição química da liga e garantindo uma geometria adequada do cordão. A metodologia de superfície de resposta (DOE) foi utilizada para planejar experimentos e analisar os efeitos da corrente, tensão e velocidade de soldagem na geometria do cordão e na diluição. Os resultados indicaram que correntes mais altas aumentam a penetração e a diluição, enquanto tensões elevadas ampliam a largura do cordão, mas reduzem a altura do reforço. Por outro lado, velocidades de soldagem mais altas reduzem a diluição e a largura do cordão, favorecendo revestimentos com menor mistura do material base. As condições ideais determinadas foram: tensão moderada (27,5 V), corrente média (140 A) e velocidade de soldagem intermediária (23 cm/min). Essas configurações equilibram deposição e baixa diluição, resultando em revestimentos com alta resistência ao desgaste e manutenção da integridade da liga aplicada. O uso do software Minitab foi fundamental no desenvolvimento de modelos empíricos, demonstrando forte correlação entre os parâmetros experimentais e os resultados obtidos, validando a eficácia do processo otimizado.

Palavras-chave: Soldagem FCAW, Otimização de parâmetros, Revestimentos Duros, Fe-Cr-C.



OPTIMIZATION OF WELDING PARAMETERS FOR FECRC-NB ALLOY HARDFACING DEPOSITION BY FCAW

ABSTRACT

This work aims to optimize welding parameters for the deposition of hardfacing coatings made of FeCrC-Nb alloy using the FCAW (Flux-Cored Arc Welding) process. The FeCrC-Nb alloy is widely used in applications requiring high wear resistance and abrasion protection. However, the coating's effectiveness depends directly on the applied welding parameters, such as current, voltage, and welding speed. This study seeks to identify conditions that minimize dilution, preserve the alloy's chemical composition, and ensure proper bead geometry. The response surface methodology (DOE) was employed to design experiments and analyze the effects of current, voltage, and welding speed on bead geometry and dilution. The results showed that higher currents increase penetration and dilution, while higher voltages expand bead width but reduce reinforcement height. Conversely, higher welding speeds reduce dilution and bead width, favoring coatings with less mixing of the base material. The optimal conditions identified were moderate voltage (27.5 V), medium current (140 A), and intermediate welding speed (23 cm/min). These configurations balance deposition and low dilution, resulting in coatings with high wear resistance while maintaining the integrity of the applied alloy. The use of Minitab software was essential for developing empirical models, demonstrating a strong correlation between the experimental parameters and the outcomes, thereby validating the effectiveness of the optimized process.

Keywords: FCAW welding, Parameter optimization, hard coatings, Fe-Cr-C.



INTRODUÇÃO

Aumentar a vida útil dos componentes mecânicos é de significativo interesse na indústria, especialmente quando se trata de desgaste abrasivo, que resulta na perda de massa, alteração dimensional e falha dos componentes (MILLER, 2005). Esse fenômeno está intimamente relacionado ao elevado custo de reposição de peças, devido não apenas ao custo dos materiais, mas também às interrupções na produção (BAPTISTA, 2009). Para mitigar esses problemas, diversos métodos foram desenvolvidos e incorporados aos processos de fabricação, visando aumentar a durabilidade dos componentes (CHAMBERLAIN, 2003).

Entre esses métodos, destacam-se as técnicas de endurecimento superficial, como o Hardfacing, que consiste na deposição por soldagem de materiais altamente resistentes ao desgaste na superfície das peças (MILLER; D'OLIVEIRA, 2002). Para melhorar a resistência ao desgaste, revestimentos duros são aplicados em superfícies de martelos e facas picadoras, utilizando diferentes processos de soldagem. Dentre os principais processos empregados, destacam-se: o Eletrodo Revestido, conhecido pelo baixo custo e alta versatilidade; o Arco Submerso, que apresenta custo moderado e maior mecanização, embora limitado em posições de soldagem; e o processo FCAW (Flux-Cored Arc Welding), amplamente reconhecido pela alta produtividade, versatilidade de materiais e custo competitivo, tornando-se o favorito em indústrias sucroalcooleiras (BUCHELY et al., 2005; KANNAN, 2006; CORONADO, 2009).

O processo FCAW possui características que o tornam ideal para aplicações em revestimentos resistentes ao desgaste. Estudos como os de LIMA e FERRAREZI (2009) demonstraram a eficácia da aplicação de revestimentos duros em facas picadoras de cana-de-açúcar utilizando arames tubulares. Esses revestimentos, compostos por ligas de FeCrC com aditivos como Ti e Nb, apresentam melhoras significativas em termos de composição química e resistência mecânica devido à redução de diluição e à manutenção de altos teores de carbono a partir da segunda camada de revestimento.

Um exemplo notável é o arame tubular UTP AF LEDURIT 68, uma liga de Fe-Cr-Nb projetada para revestimentos anti-desgaste em aplicações que envolvem impactos moderados e abrasão severa. Recomendado para temperaturas de até 450 °C, este material é amplamente utilizado em mineração, fábricas de cimento, pedreiras, siderúrgicas e usinas de açúcar. Aplicações comuns incluem revestimentos protetores de lâminas, bordas de caçambas e martelos de moinhos, destacando sua robustez e durabilidade.

A eficácia do processo FCAW está diretamente ligada à otimização de seus parâmetros, como corrente, tensão, velocidade de soldagem e taxa de alimentação do arame. Essas variáveis afetam não apenas a qualidade do revestimento, mas também a produtividade e os custos



envolvidos. Nesse contexto, o Design of Experiments (DOE), ou Projeto de Experimentos, surge como uma ferramenta fundamental. O DOE permite planejar, executar e analisar experimentos de forma sistemática e eficiente, reduzindo falhas e identificando a influência de variáveis independentes sobre os resultados desejados. Essa abordagem possibilita também a análise de interações entre fatores, promovendo uma otimização mais precisa.

Revisões recentes sobre o uso do DOE em processos de soldagem têm demonstrado sua relevância na melhoria de propriedades como dureza, microestrutura e resistência ao desgaste (ROWLANDS, 2003). A aplicação dessa metodologia permite explorar de forma abrangente as interações entre variáveis e identificar condições ótimas com maior eficiência, reduzindo custos e tempo de experimentação.

Este trabalho tem como objetivo investigar a otimização dos parâmetros de soldagem para a deposição de revestimentos duros utilizando arames tubulares de liga FeCrC-Nb no processo FCAW. Por meio do DOE, busca-se identificar as melhores condições de processo para maximizar a resistência ao desgaste dos revestimentos, garantindo a confiabilidade e a eficiência nas aplicações industriais. Assim, este estudo contribui para a melhoria dos processos de soldagem e para o aumento da vida útil de componentes submetidos a condições severas de trabalho.

2. METODOLOGIA

Neste trabalho foram realizados cordões de solda com o objetivo de verificar a geometria e diluição do depósito para fabricação de revestimentos resistentes à abrasão. Para isso, foi utilizado a fonte de soldagem SUMIG Halk300 e um manipulador da tocha de soldagem. O arame utilizado foi o UTP AF LEDERUT 68, conforme especificação do fabricante, com a composição química apresentada na Tabela 1.

Tabela 1: Composição química dos arames tubulares e do metal de base.

Especificação	Composição Química (%)					
	C	Si	Mn	Cr	Nb	Fe
UTP AF LEDERUT 68	3,41	1,05	0,228	17,88	3,06	Balanço

Fonte: UTP.

Os cordões foram depositados em chapas de aço AISI 1020 nas dimensões 100x150x6mm³. O gás de proteção utilizado foi uma mistura comercial de Argônio e Dióxido de Carbono (Ar+CO²) com vazão de 18 L/min. Inicialmente, nos ensaios preliminares foram testados parâmetros de soldagem para a deposição dos cordões e o resultado ficou dentro de



uma faixa entre 80 e 200 A para a corrente de soldagem, na faixa de 25 a 30 V para a tensão e na faixa de 19 a 27 cm/min para a velocidade de soldagem. Após a realização dos testes preliminares e determinação dos limites dos parâmetros foi realizado um planejamento de experimentos (DOE).

2.1. PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS (DOE)

Para o planejamento do experimento, foi utilizado o software Minitab®, aplicando o método de Superfície de Resposta com três variáveis em cinco níveis. Um projeto composto central foi adotado para identificar as principais características e interações entre os parâmetros do processo, além de obter equações para cada resposta avaliada, com foco na diluição e na geometria do cordão de solda.

Foram gerados gráficos fatoriais e superfícies de resposta, permitindo uma análise mais aprofundada dos efeitos das variáveis: largura (L) reforço (R), penetração (P) e percentual de diluição (%D) dos cordões. Essa abordagem possibilitou uma compreensão detalhada do impacto de cada variável selecionada sobre as respostas de interesse. A escolha dos fatores e dos níveis foi baseada em ensaios preliminares, sendo considerado para este sistema a influência de três variáveis de entrada: a tensão (V), a corrente (I) e a velocidade de soldagem (Vsol). A Tabela 2 apresenta os parâmetros de soldagem utilizados como variáveis de entrada e seus respectivos níveis.

Tabela 2: Parâmetros de soldagem utilizados nos experimentos.

Parâmetros	Níveis					
	Notações	$-\alpha$	-1	0	1	α
Corrente	A	40	80	140	200	240
Tensão	V	23,3	25	27,5	30	31,7
Velocidade de soldagem	cm/min	16,3	19	23	27	29,7
Distância de afastamento	mm			18		
Ângulo	°			90		

Fonte: dos autores.

O modelo das equações considerou todos os termos lineares, quadráticos e a interação entre os termos e pode ser expresso pelo polinômio Y, conforme Equação 01.



$$Y = +b_0 + b_1V + b_2I_m + b_3V_{sol} + b_{11}V^2 + b_{22}I_m^2 + b_{33}V_{sol}^2 \\ + b_{12}V I_m + b_{13}V V_{sol} + b_{23}I_m V_{sol}$$

Equação 01

2.2. FABRICAÇÃO DOS CORDÕES

Com o planejamento dos experimentos em mãos, foram fabricados seguindo a matriz de planejamento experimental descritos na Tabela 3. Além disso, nesta tabela está apresentado os valores médios dos parâmetros do processo e as respostas para cada experimento.

Tabela 3: Desenvolvimento do experimento e respostas de geometria e diluição.

Ens.	Tensão (V)	Corrente (A)	Vel. Soldagem (cm/min)	Área reforço (mm ²)	Área penetração (mm ²)	Largura (mm)	Altura reforço (mm)	Prof. Penetração (mm)	Diluição (%)
1	25,0	200	27,0	17,1	5,3	8,6	2,8	1,2	23
2	27,5	140	23,0	15,3	15,2	11,5	2,2	2,2	50
3	23,3	140	23,0	35,6	3,4	8,1	5,2	0,8	9
4	27,5	140	23,0	34,2	59,3	14,8	3,2	5,5	63
5	25,0	80	27,0	12,0	2,3	6,6	2,7	0,6	16
6	25,0	200	19,0	10,3	6,8	8,9	1,7	1,1	40
7	27,5	140	16,3	27,9	3,3	6,7	4,7	0,8	11
8	27,5	39	23,0	29,8	26,8	12,6	3,3	3,1	47
9	30,0	80	19,0	19,5	3,6	7,4	3,4	0,9	15
10	27,5	240	23,0	13,8	56,1	13,1	1,6	5,5	80
11	30,0	200	19,0	9,9	4,7	7,9	1,8	1,0	32
12	25,0	80	19,0	43,7	22,4	10,5	2,7	3,5	34
13	27,5	140	23,0	30,2	27,3	11,9	3,6	3,9	48
14	27,5	140	23,0	13,5	11,2	9,7	2,0	1,9	45
15	30,0	200	27,0	18,4	15,2	10,5	2,5	2,5	45
16	27,5	140	23,0	18,7	18,1	10,7	2,5	2,9	49
17	31,7	140	23,0	19,5	16,2	10,5	2,6	2,6	45
18	27,5	140	29,7	18,5	16,8	10,6	2,5	2,6	47
19	30,0	80	27,0	18,2	18,5	11,2	5,7	2,9	50
20	27,5	140	23,0	18,1	17,2	10,4	2,5	2,7	49

Fonte: dos autores.



Para a realização dos testes e fabricação dos corpos de prova, foram realizados 3 cordões de solda em cada chapa usando os mesmos parâmetros para cada uma das 20 condições apresentadas no DOE. Após a realização das soldas, uma amostra de cada cordão foi retirada utilizando corte abrasivo para análise de geometria do cordão.

Em seguida, estas amostras foram embutidas em resina e preparadas com procedimento metalográfico, usando lixas de granulometria #80, #220, #400 e #600, em seguida foi realizado polimento com pasta diamantada e ataque químico com nital 3%. Essa preparação metalográfica foi suficiente para revelar o contorno dos cordões para as análises de geometria.

Imagens que possibilitaram a análise dos cordões foram realizadas usando estereoscópio STEMI-2000, com câmera ZEISS, usando ampliação de 6,5x. Com essas imagens e com o auxílio do software Image-Pro foi possível realizar a calibração dos pixels e medir as áreas de penetração e reforço, e medidas lineares da largura do cordão, a altura do reforço e a profundidade de penetração do cordão. O percentual de diluição foi medido através da proporção das áreas de penetração e total do cordão usando a Equação 02:

$$D = \left(\frac{\text{Área de penetração}}{\text{Área Total}} \right) * 100 = \left(\frac{A}{A + B} \right) \quad \text{Equação 02}$$

Na análise dos resultados, foram avaliadas as características de qualidade dos revestimentos quanto à acabamento superficial, aderência e continuidade, verificando possíveis defeitos visíveis e inconsistências.

Com os resultados obtidos sobre a geometria e a diluição dos cordões, foi possível realimentar o software Minitab, permitindo a identificação e otimização das melhores condições de soldagem. Dessa forma, foi determinada a combinação ideal de parâmetros de soldagem para otimizar os processos e melhorar a qualidade do revestimento, com foco em propriedades como resistência ao desgaste e desempenho geral. A partir desses resultados, os parâmetros poderão ser ajustados e refinados de maneira sistemática para garantir um desempenho superior dos revestimentos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados estão apresentados iniciando pela matriz de delineamento experimental, contendo os valores médios dos parâmetros do processo e suas respectivas respostas (Tabela 3), seguido das imagens da seção transversal dos cordões (Figura 1), modelos empírico para as respostas de geometria (Equações 3 - 6) e, finalmente, os efeitos de cada variável em relação as respostas de geometria do cordão (Figura 2).

3.1 GEOMETRIA DOS CORDÕES

A Figura 1 mostra as características geométricas para cada um dos depósitos de solda. Além disso, é apresentado os valores dos parâmetros de soldagem utilizados nos depósitos.

Figura 1: Imagens transversais dos depósitos, mostrando as variações de corrente e velocidade de soldagem.



Fonte: dos autores.



Com a observação da seção transversal das imagens apresentadas na Figura 1, é possível observar que alguns dos cordões apresentaram uma boa qualidade geométrica e estão adequados para aplicações em revestimentos onde se requer resistências à abrasão sem prejudicar as características do revestimento duro. Entretanto, cordões com maior penetração, geralmente os cordões depositados com maior aporte térmico (maior tensão e corrente, ou menor velocidade de soldagem), apresentam maior diluição sendo indesejados para tal aplicação.

3.2 DESENVOLVIMENTO DO MODELO EMPÍRICO

A matriz apresentada na Tabela 3 foi utilizada como base para a análise do comportamento das variáveis envolvidas no processo de soldagem, servindo também como referência para o desenvolvimento dos modelos empíricos. Esses modelos foram elaborados com o objetivo de avaliar os principais parâmetros do cordão de solda depositado pelo processo FCAW (Flux-Cored Arc Welding), incluindo largura, penetração, reforço e diluição. A seguir, são apresentados os resultados dessa análise e os modelos empíricos desenvolvidos.

$$\begin{aligned} \text{Diluição} = & -944 + 66,4 \text{ Voltagem} + 0,147 \text{ Corrente} + 1,0 \text{ Velocidade} - 1,581 \text{ Voltagem*Voltagem} \\ & + 0,000865 \text{ Corrente*Corrente} - 0,572 \text{ Velocidade*Velocidade} - 0,0018 \\ & \text{Voltagem*Corrente} + 1,024 \text{ Voltagem*Velocidade} - 0,0105 \text{ Corrente*Velocidade} \end{aligned} \quad \text{Equação 03}$$

$$\begin{aligned} \text{Penetração} = & -22,7 + 0,79 \text{ Voltagem} - 0,0759 \text{ Corrente} + 1,232 \text{ Velocidade} - 0,0018 \\ & \text{Voltagem*Voltagem} - 0,000093 \text{ Corrente*Corrente} - 0,00684 \\ & \text{Velocidade*Velocidade} + 0,00444 \text{ Voltagem*Corrente} - 0,0362 \\ & \text{Voltagem*Velocidade} - 0,000397 \text{ Corrente*Velocidade} \end{aligned} \quad \text{Equação 04}$$

$$\begin{aligned} \text{Reforço} = & 1,3 + 0,33 \text{ Voltagem} + 0,0611 \text{ Corrente} - 0,34 \text{ Velocidade} - 0,0077 \\ & \text{Voltagem*Voltagem} - 0,000037 \text{ Corrente*Corrente} + 0,0041 \text{ Velocidade*Velocidade} \\ & - 0,00149 \text{ Voltagem*Corrente} + 0,0029 \text{ Voltagem*Velocidade} + 0,00002 \\ & \text{Corrente*Velocidade} \end{aligned} \quad \text{Equação 05}$$

$$\begin{aligned} \text{Largura} = & -23,8 + 2,23 \text{ Voltagem} - 0,1193 \text{ Corrente} + 0,228 \text{ Velocidade} - 0,0342 \\ & \text{Voltagem*Voltagem} - 0,000163 \text{ Corrente*Corrente} - 0,00110 \\ & \text{Velocidade*Velocidade} + 0,00606 \text{ Voltagem*Corrente} - 0,0170 \\ & \text{Voltagem*Velocidade} + 0,000530 \text{ Corrente*Velocidade} \end{aligned} \quad \text{Equação 06}$$

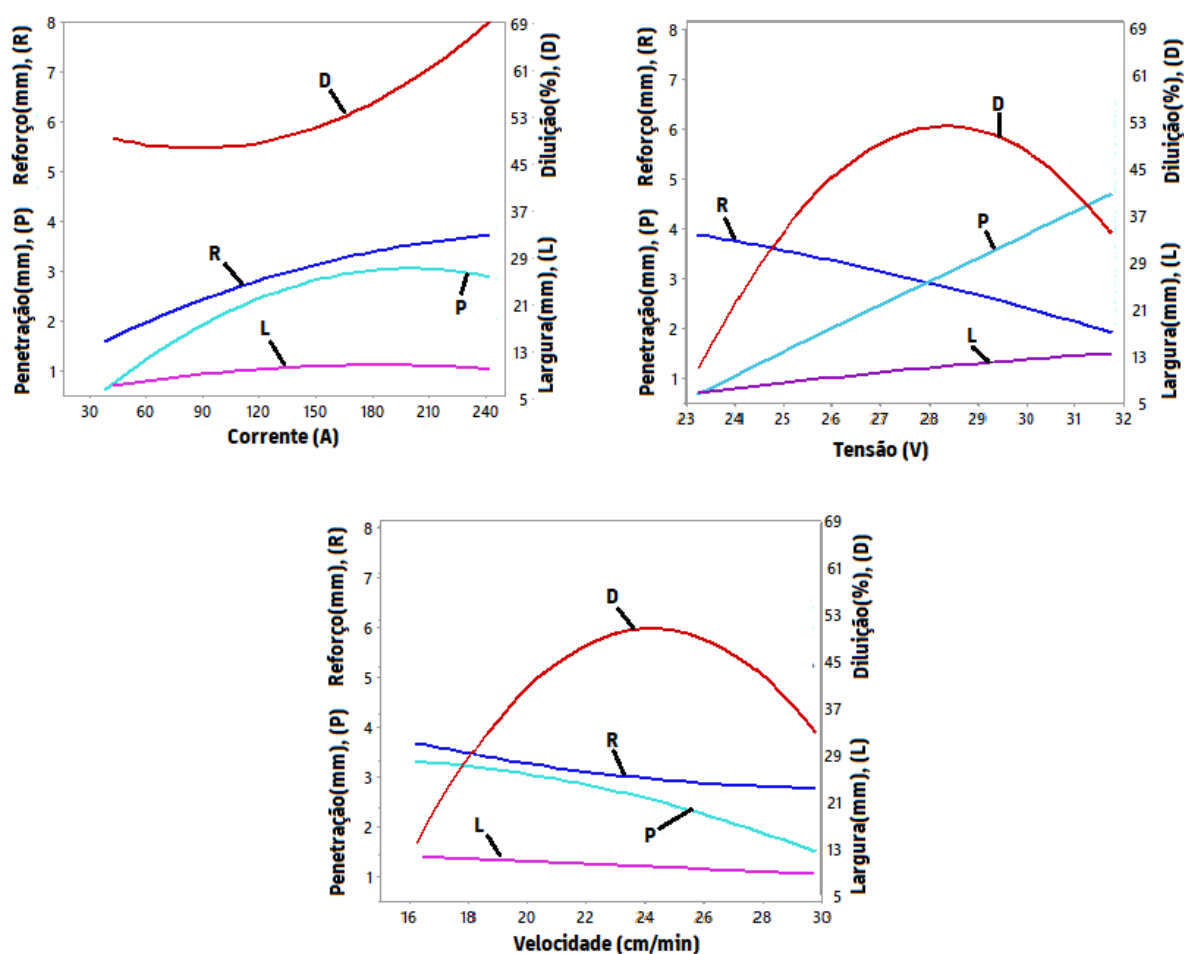
Os modelos desenvolvidos com base nos dados experimentais apresentaram tendências consistentes com o comportamento térmico e metalúrgico do processo de soldagem. Assim, ao se manterem as mesmas condições de soldagem, esses modelos podem ser utilizados para prever com precisão a geometria dos cordões em função dos parâmetros selecionados. Além disso, sua integração ao software Minitab possibilita a análise estatística e a obtenção de

configurações otimizadas, garantindo resultados alinhados com os objetivos de qualidade e desempenho desejados.

3.3 EFEITO DIRETO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM NO CORDÃO

Com base nos resultados desse experimento, a Figura 2 mostra os efeitos de variáveis: corrente de soldagem (I), tensão (V) e velocidade de soldagem (V_{sol}) na diluição e nas características geométricas, largura (L) reforço (R), penetração (P) e percentual de diluição (%D) do cordão de solda.

Figura 2: Influência direta dos parâmetros de soldagem na geometria do cordão.



Fonte: dos autores.



▪ Efeitos Principais da Corrente de Soldagem na Geometria dos Cordões

A corrente de soldagem tem um impacto significativo nas características geométricas dos cordões de solda. Com base nos dados apresentados na Figura 2(a), é possível perceber que o aumento da corrente de soldagem favorece uma maior penetração e aumenta a diluição, o que pode ser indesejável em aplicações que requerem maior resistência ao desgaste. Isso ocorre devido à maior densidade de corrente e profundidade do arco, que intensificam a fusão do material base. A profundidade de penetração aumenta com o aumento da corrente de soldagem devido ao calor gerado no arco, resultando em maior fusão do material base e, conseqüentemente, em uma penetração mais profunda, como pode ser observado no fundido ensaio 04 com 140 A, onde a área de penetração atingiu 59,3 mm². Além disso, correntes altas e velocidade de soldagem baixa promovem maior fluidificação do material, o que facilita o espalhamento lateral do cordão, ampliando sua largura. Com o aumento da profundidade de penetração e da largura do cordão, maiores volumes de material de base são misturados ao metal de solda aumentando a diluição. O reforço continua aumentando devido ao aumento da taxa de deposição gerada pelo aumento da corrente de soldagem, mesmo que em correntes mais altas, o metal fundido tende a se espalhar mais, reduzindo a altura do reforço no cordão. Um exemplo disso podem ser observados nos ensaios 12 (80 A, área de reforço = 43,71 mm²) com áreas de reforço maiores em relação ao ensaio 11 (200 A, área de reforço = 9,9 mm²).

Efeitos Principais da Tensão na Geometria dos Cordões

A tensão de soldagem influencia diretamente a forma e a qualidade dos cordões, afetando a distribuição do calor e a estabilidade do arco. Os resultados gráficos apresentados na Figura 2(b) mostram que a tensão de soldagem tem impacto significativo na geometria dos cordões, principalmente na largura do cordão. Tensões mais altas promovem maior largura e penetração, ao custo de uma menor altura de reforço e maior diluição, o que pode comprometer a qualidade do revestimento. Isso ocorre porque o aumento da tensão promove um arco mais longo, espalhando o calor e reduzindo a concentração de metal fundido no cordão. Um exemplo disso está apresentado no ensaio 04, onde a tensão é de 27,5 V e a área de penetração foi de 59,3 mm² (a maior da tabela), isso ocorre devido à estabilidade do arco e à maior transferência de calor. Por outro lado, tensões mais baixas concentram o material, resultando em reforços mais altos e menor diluição, mas com menor penetração e largura, como no ensaio 5 (25 V), onde a área de penetração foi apenas 2,3mm². Isso ocorre porque o arco mais curto concentra o calor na superfície. A escolha da tensão ideal depende das propriedades desejadas no cordão, equilibrando largura do cordão, área de reforço e diluição. Embora a tensão aumentada possa melhorar a fusão lateral, ela não impacta a penetração de forma tão significativa quanto a corrente, resultando em uma diluição mais moderada. Além disso, o uso de tensões mais altas,



promovem um arco mais longo e espalhado, aumentando a largura e reduzindo a altura do reforço do cordão.

▪ **Efeitos Principais da Velocidade de soldagem na Geometria dos Cordões**

A velocidade de soldagem é um parâmetro essencial na definição da geometria do cordão, afetando a deposição de material, o tempo de interação térmica e a diluição. Os resultados apresentados na Figura 2(c) mostram que velocidades mais baixas resultam em maior deposição de material, maior largura e profundidade do cordão, além de maior diluição. Por outro lado, velocidades mais altas produzem cordões mais estreitos, com menor altura de reforço e penetração, reduzindo a diluição. Contudo, há um limite superior para a velocidade, além do qual a qualidade do cordão pode ser comprometida. Esse comportamento pode ser explicado pelo menor tempo de interação térmica em velocidades mais altas, que reduz a profundidade de penetração e a área de reforço, consequentemente diminuindo a diluição. No ensaio 05 (27 cm/min), por exemplo, a profundidade de penetração foi de apenas 0,6 mm e a área de reforço, (12,0 mm²). Velocidades mais baixas favorecem maior deposição de material por unidade de comprimento, já que o arco permanece mais tempo em cada ponto, aumentando tanto a área de reforço quanto a penetração do cordão devido ao maior calor transferido. Quanto à largura do cordão, velocidades mais altas produzem cordões mais estreitos, enquanto velocidades mais baixas geram maior largura devido à maior dispersão do metal fundido e ao maior tempo de exposição ao calor. A diluição, por sua vez, é diretamente relacionada à corrente e à velocidade de soldagem. Em velocidades maiores, como no ensaio 19 (27 cm/min), a diluição foi reduzida de 50% para 32% em relação ao ensaio 11 (19 cm/min), reduzindo a fusão do material base e menor mistura com o material depositado. O aumento da velocidade de soldagem, portanto, limita a fusão lateral, resultando em cordões mais estreitos, com menor altura de reforço e menor penetração, ao mesmo tempo em que reduz a diluição. Isso se deve à menor interação térmica e ao menor volume de material depositado por unidade de comprimento, impactando diretamente a geometria e a qualidade do cordão.

▪ **Síntese e otimização dos parâmetros**

Os principais efeitos dos parâmetros de soldagem – corrente, tensão e velocidade de soldagem – influenciam diretamente a geometria dos cordões e a diluição no processo FCAW. A corrente de soldagem apresentou impacto significativo na profundidade de penetração e na diluição, com maiores correntes resultando em penetrações mais profundas e maior mistura entre o material base e o material depositado. A tensão, por sua vez, foi determinante na largura do cordão e na estabilidade do arco elétrico, com tensões mais elevadas gerando cordões mais largos e contribuindo para uma maior área de penetração. Já a velocidade de soldagem



influenciou amplamente a área de reforço, a altura do cordão e a diluição, sendo que velocidades mais baixas resultaram em maior deposição de material, penetração mais profunda e maior diluição, enquanto velocidades mais altas reduziram esses efeitos, gerando cordões mais estreitos e com menor diluição.

Entre os parâmetros analisados, a corrente de soldagem mostrou-se o fator mais influente, principalmente em relação à profundidade de penetração e à diluição. Configurações com menor corrente e maior velocidade de soldagem, como 80 A e 27 cm/min, foram associadas às menores taxas de diluição, favorecendo revestimentos com maior resistência ao desgaste e menor mistura com o material base. Dessa forma, a otimização desses parâmetros permite alcançar uma geometria de cordão adequada às necessidades do processo e melhorar a eficiência do revestimento.

CONCLUSÕES

No entanto, os experimentos realizados neste trabalho permitiram concluir que:

1. A corrente de soldagem foi identificada como o parâmetro mais influente, impactando diretamente a profundidade de penetração e a diluição. Correntes mais altas aumentam a fusão e a diluição, enquanto correntes mais baixas minimizam a diluição, mas resultam em cordões mais superficiais e menos robustos.
2. A tensão teve papel significativo na largura e estabilidade do cordão. Tensões moderadas (27,5 V) ofereceram equilíbrio entre reforço e diluição, permitindo maior controle na distribuição do material e na qualidade do revestimento.
3. A velocidade de soldagem mostrou-se determinante para controlar a diluição e ajustar a altura e a largura do cordão. Velocidades mais altas reduziram a diluição, favorecendo revestimentos com menor mistura do material base, sendo ideais para aplicações de alta resistência ao desgaste.
4. Ensaio com parâmetros otimizados, como tensão moderada (27,5 V), corrente média (140 A) e velocidade intermediária (23 cm/min), apresentaram o melhor equilíbrio entre deposição, penetração e baixa diluição, garantindo revestimentos adequados para aplicações industriais críticas.
5. A utilização da metodologia DOE e do software Minitab demonstrou-se essencial para prever e otimizar os parâmetros de soldagem. Os resultados obtidos podem ser amplamente aplicados em indústrias que demandam revestimentos resistentes ao desgaste, melhorando a durabilidade de componentes e reduzindo custos operacionais.



REFERÊNCIAS

BAPTISTA, A.L.B.; NASCIMENTO, I.A. Revestimentos Duros Resistentes ao Desgaste Depositados por Soldagem Utilizados na Recuperação de Elementos de Máquinas. Spectru Instrumental Científico, 2009.

BUCHELY, M.F., GUTIERREZ, León, J.C., TORO, A., 2005, “The effect of microstructure on abrasive wear of hardfacing alloys”, Wear, 259, pp 52-61.

CHAMBERLAIN, S., 2003, “Combating Tools Wear with Coating”, The Fabricator, Disponível em: < <http://www.thefabricator.com> > Acesso em: 25 novembro de 2024.

CORONADO, J.J.; CAICEDO, H.F.; GOMEZ, A.L. The effects of welding processes on abrasive wear resistance for hardfacing deposits. Tribology International, v. 42, p 745 749, 2009.

D'OLIVEIRA, A.S.C.M.; VILAR, R.; FEDER, C.G. Feder High Temperature Behaviour of Plasma Transferred Arc and Laser Co-based Alloy Coatings. Applied Surface Science. v. 201, p.154160, 2002.

KANNAN, T.; MURUGAN, N. Effect of Flux Cored Arc Welding Process Parameters on Duplex Stainless Steel Clad Quality. Journal of Materials Processing Technology. v. 176, p 230 239, 2006.

LIMA, A. C., e FERRARESI, V. A. Análise da Microestrutura e da Resistência ao Desgaste de Revestimento Duro Utilizado Pela Indústria Sucroalcooleira. Soldagem & Inspeção, v. 14, 2009, p. 140/5-150.

MILLER, B. Frequently Asked Questions about Hardfacing, The Fabricator, 2005.

ROWLANDS, H.; ANTONY, F. Application of design of experiments to a spot welding process. Assembly Automation, v. 23, n. 3, p. 273- 279, 2003.