



Recebido em 20/04/2024.

Aceito em 21/05/2024.

Edição Especial - 2024

## **PROPOSTA DE UMA ANALISE DE REGRESSÃO PARA UM PROCESSO DE SOLDAGEM COM ARAME TUBULAR PULSADO ATRAVÉS DOS SINAIS DE CORRENTE E TENSÃO**

### *PROPOSAL FOR A REGRESSION ANALYSIS FOR A WELDING PROCESS WITH PULSE TUBULAR WIRE USING CURRENT AND VOLTAGE SIGNALS*

João Roberto Sartori Moreno<sup>1</sup>

Alisson Caetano Neves<sup>2</sup>

Celso Alves Correa<sup>3</sup>

Janaina Fracaro Souza Gonçalves<sup>4</sup>

**Resumo** – Este estudo propõe a análise estatística de soldas de revestimento utilizando processo de soldagem com arame tubular e corrente contínua pulsada (P-FCAW), com análise de variância para analisar a eficácia de modelo de regressão de primeira ordem e relacionar os valores obtidos de corrente média, tensão média, potência média, largura e reforço. Corpos de prova de aço SAE 1020 foram usados para receber cordões de revestimento de arame metálico tubular em inoxidável martensítico 410 NiMo. Alguns parâmetros de soldagem foram mantidos constantes como a composição do gás e vazão, quantidade de cordões, corrente de pico e tempo de pico entre outros, enquanto corrente média, frequência de pulsação, velocidade de soldagem e DBCP são variados em três níveis, conforme método de TAGUCHI (L9) visando reduzir o número combinações. Portanto, a análise de variância foi aplicada nos resultados e estatisticamente a corrente média e a distância bico de contato peça foram as variáveis que mais influenciaram as respostas obtidas. O coeficiente de determinação ou  $R^2$  da regressão linear simples para quatro modelos foram acima de 80%, enquanto que nos sinais elétricos ficou entre 85 e 97%. A maior largura obtida foi de 11,49 mm na corrente média de 230 A, velocidade de soldagem de 300 mm/min, distancia bico de contato peça de 30mm e frequência de pulsação de 30,30Hz.

**Palavras-chave:** Arame Tubular Pulsado. 410NiMo. Parâmetros de Soldagem. Modelo de Regressão.

**Abstract** - This study proposes the statistical analysis of coating welds using the welding process with cored wire and pulsed direct current (P-FCAW), with analysis of variance to analyze the effectiveness of the first order regression model and relate the obtained values of average current,

<sup>1</sup>Professor PhD Ciências dos Materiais na UTFPR–Cornélio Procópio–PR; Contato: joaosartori@utfpr.edu.br.

<sup>2</sup>Mestre em Engenharia Mecânica pela UTFPR–Cornélio Procópio–PR Contato: alissonneves@gmail.com.

<sup>3</sup>Professor Doutor em Engenharia Mecânica; UTFPR–Cornélio Procópio–PR; Contato: cacorrea@utfpr.edu.br.

<sup>4</sup>Professora Doutora Departamento de Engenharia Mecânica; UTFPR–Londrina–PR; Contato: janainaf@utfpr.edu.br.

*medium voltage, medium power, width and reinforcement. SAE 1020 steel test specimens were used to receive 410 NiMo martensitic stainless steel cored metal cored wire covering strands. Some welding parameters were kept constant, such as gas composition and flow rate, number of beads, peak current and peak time, among others, while average current, pulsation frequency, welding speed and DBCP are varied at three levels, according to the method. of TAGUCHI (L9) aiming to reduce the number of combinations. Therefore, the analysis of variance was applied to the results and statistically, the average current and the contact tip workpiece distance were the variables that most influenced the responses obtained. The coefficient of determination or  $R^2$  of the simple linear regression for four models was above 80%, while for electrical signals it was between 85 and 97%. The largest width obtained was 11.49 mm at an average current of 230 A, welding speed of 300 mm/min the contact tip workpiece distance of 30 mm and pulsation frequency of 30.30 Hz.*

**Keywords:** Pulsed Tubular Wire. 410NiMo. Welding Parameters. Regression Model.

## I. INTRODUÇÃO

Processos de soldagem com arco elétrico e arame tubular (FCAW - *Flux Cored Arc Welding*) surgiram do desenvolvimento e busca por processos mais eficazes, com vantagens como: alta qualidade do metal de solda depositado; excelente aparência do cordão de solda; boas características do arco e baixo nível de respingos. Também acrescenta-se que existe uma taxa de fusão do arame tubular maior que do arame sólido na mesma faixa de corrente, pois o invólucro tubular metálico tem menor massa condutora e isso proporciona maior densidade relativa de corrente (Marques; Modenesi; Bracarense, 2005).

A composição do arame consumível ajuda na proteção das gotas no momento em que elas se desprendem do arame em direção à poça de fusão, além de ajudar a dar formato ao cordão de solda por conta da escória (Ghosh, 2017). Os processos FCAW, sendo um desdobramento dos processos de soldagem GMAW, oferecem benefícios em sua utilização tanto no âmbito metalúrgico, por conta de elementos de liga presentes no arame consumível. Com a utilização da corrente pulsada, possível através do desenvolvimento de fontes de soldagem com tecnologia embarcada há um maior controle de deposição e, consequentemente, maior estabilidade do processo para fins de manufatura (Heringer e Lincoln, 2023).

A corrente pulsada teve seu desenvolvimento após a década de 1960, utilizando um nível de intensidade de corrente média inferior à obtida em corrente convencional, e a pulsação da corrente foi originalmente introduzida para controlar a transferência do metal, por imposição artificial do ciclo de operação do sistema de arco, e na pulsada pode-se soldar em todas as posições, obtendo-se ter maior taxa de deposição quando comparada a corrente convencional (Díaz, 2018).

Os parâmetros elétricos na soldagem com corrente pulsada são a corrente de pico ( $I_p$ ), corrente de base ( $I_b$ ), tempo de pico ( $t_p$ ), tempo de base ( $t_b$ ), corrente média ( $I_m$ ) além da velocidade de alimentação do arame. O conhecimento teórico nos processos de soldagem são uma forma de prever a qualidade do processo e às condições estabelecidas para sua realização e para o resultado final pretendido com normas técnicas, normas para classificação de materiais e consumíveis, mapas operacionais e artigos de pesquisa sobre parametrização (Souza, 2010; American Welding Society, 2022). Esta análise passa pela avaliação e regulagem de parâmetros anteriormente ou durante o processo, e pelo estudo dos parâmetros coletados após o ensaio, a depender do parâmetro foco.

A etapa de prever a qualidade refere-se à determinação adequada dos parâmetros de processo adequados e a avaliação do resultado final está em verificar se o processo ocorreu tal como esperado, ou seja, sem instabilidades. Esta análise passa pela avaliação

e regulagem de parâmetros anteriormente ou durante o processo, e pelo estudo dos parâmetros coletados após o ensaio, a depender do parâmetro foco. Portanto, um processo de soldagem estável é considerado aquele que garanta tanto uma transferência metálica estável quanto a manutenção do arco elétrico (Scotti; Ponomarev, 2012), e que segundo Biao *et al.* (2008) demonstrou-se a relação positiva entre a entropia aproximada da corrente e a avaliação da estabilidade de um processo GMAW.

Por sua vez, Neves *et al.* (2021), atestaram a eficácia da estabilidade de processos FCAW pulsado através de estudos estatísticos da variação dos sinais de corrente e tensão. Rezende *et al.* (2011), estudaram a estabilidade de processos GMAW através da interpretação de índices numéricos que traduzem a variação de fenômenos de transferência metálica (tempo e período de transferência e seus desvios padrão).

A corrente média pulsada pode ser calculada segundo Díaz *et al.* (2018) de acordo com a equação 1.

$$I_m = ((I_p * t_p) + (I_b * t_b)) / (t_p + t_b) \quad (1)$$

Segundo Sgobbi *et al.* (2015) e Zhang *et al.* (2023) na avaliação da estabilidade de processos de soldagem não existe uma única metodologia, porque o processo é afetado pela maioria das variáveis de soldagem. Os sinais de corrente e tensão também têm sido utilizados para criar ciclogramas que são um novo método para análise de estabilidade no processo de soldagem, de acordo com Puñales and Afaro (2021).

Por fim, sabendo da relação da transferência metálica e a estabilidade do processo, é foi possível a verificação da análise entre a corrente e tensão e, qualificar a estabilidade do processo de soldagem por meio de análise estatística.

## II. METODOLOGIA

O metal de base utilizado foi um aço SAE 1020 (185,00 x 63,50 x 12,70mm) e o metal de adição foi um arame tubular inoxidável martensítico de 1,20 mm utilizado para recuperação de turbinas hidrelétricas, cuja especificação é AWS EC410NiMo MC da ESAB 2013, conforme “Tabela 1”.

Porém, a bancada de ensaios apresentada na “Figura 1” tem uma fonte de soldagem (Inversal 450), um alimentador de arame (STA-20), uma tocha reta de 2,0 metros de comprimento (TBI-511-AUT), um equipamento de deslocamento da tocha (Tartílope V2), um sistema em módulos (NI cDAQ 9172), um transdutor de sinal da tensão para placa de aquisição (SECON 100V010VAC - 220VAC) conforme “Figura 2”, um transdutor de sinal da corrente para placa de aquisição (SECON 600R010VAC - 220VAC).

Tabela 1- Composição química do metal de base e adição.

| Metal de Base (a) |             | Metal de Adição (b) |           |
|-------------------|-------------|---------------------|-----------|
| Elementos         | Teor em %   | Elementos           | Teor em % |
| C                 | 0,18 a 0,23 | C                   | 0,027     |
| Cr                | 0,150 máx.  | Cr                  | 12,500    |
| Cu                | 0,200 máx.  | Mn                  | 0,590     |
| Mn                | 0,30 a 0,60 | Mo                  | 0,430     |
| Ni                | 0,150 máx.  | Ni                  | 4,860     |
| P                 | 0,030 máx.  | P                   | 0,024     |
| S                 | 0,035 máx.  | S                   | 0,006     |
| Si                | 0,10 a 0,30 | Si                  | 0,440     |
| Sn                | 0,060 máx.  | ---                 | ---       |

|                             |     |                             |     |
|-----------------------------|-----|-----------------------------|-----|
| Resistência Tração<br>(MPa) | 440 | Resistência Tração<br>(MPa) | 910 |
|-----------------------------|-----|-----------------------------|-----|

Fonte: GERDAU (a), ESAB (b).

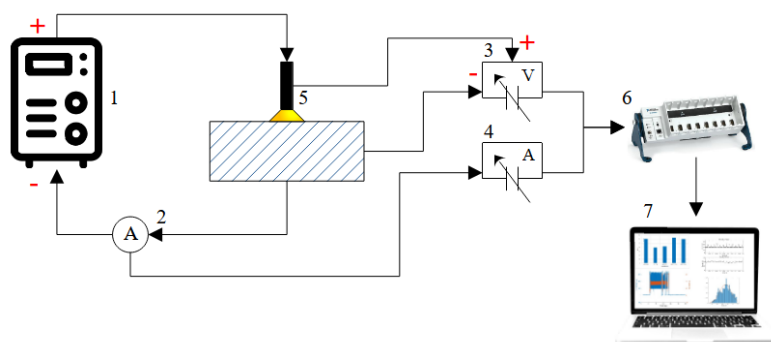
Todos os corpos de provas antes da soldagem foram submetidos a um processo de jateamento abrasivo, para obter uma superfície isenta de graxa, óleo e contaminantes, pois posteriormente, para controlar a temperatura de soldagem em 150°C antes da soldagem os corpos de prova, os mesmos foram pré-aquecidos a uma temperatura de 200°C em um forno mufla, depois levado a bancada de soldagem e posteriormente soldados (Correa, 2018).

Figura 1- Bancada esquemática utilizada para os experimentos.



1. Fonte de soldagem; 2. Alimentador de arame; 3. Sistema de refrigeração da tocha  
4. Sistema de aquisição de dados; 5. Tocha; 6. Sistema de deslocamento da tocha; 7. Gases de proteção  
Fonte: Autoria própria.

Figura 2 - Diagrama de blocos simplificado do sistema de medição e aquisição de dados.



Fonte: Autoria própria.

Foi utilizado um planejamento experimental com o método TAGUCHI L9, onde a “Tabela 2” mostra as variáveis de influência e níveis, e na “Tabela 3” a combinação dos ensaios, e para diminuir os erros aleatórios a sequência de realização foi 5, 3, 9, 1, 4, 8, 6, 2, 7.

Para os ensaios fixou-se parâmetros para reduzir a variabilidade de combinações deles, sendo 1 cordão de solda na posição plana, a polaridade do eletrodo (CCEP), a posição da tocha de soldagem (90 graus), o gás de proteção (Ar + 2%O<sub>2</sub>) com vazão de 15L/min.; a corrente de pico de 350A e tempo de pico (8ms).

Tabela 2 - Variáveis de influência e seus níveis.

| Variáveis / Níveis                      | -1    | 0     | 1     |
|-----------------------------------------|-------|-------|-------|
| Corrente Média – I <sub>m</sub> (A)     | 170   | 200   | 230   |
| Frequência da Pulsação – F (Hz)         | 18,18 | 20,00 | 22,22 |
| Velocidade de Soldagem - V <sub>s</sub> | 300   | 350   | 400   |
| Distância Contato Bico Peça - DBCP      | 30    | 35    | 40    |

Fonte: Autoria própria.

A obtenção dos sinais de corrente e tensão foi pela plataforma LabVIEW, e o tratamento dos sinais pelo software MATLAB. Os cinco resultados obtidos de cada amostra são com intervalo de 0,5 segundos para uma melhor compreensão, visualização e como os mesmos se comportam ao longo do tempo. Os intervalos avaliados são de 16 a 16,5; 18 a 18,5; 20 a 20,5; 22 a 22,5 e 24 a 24,5 segundos.

Tabela 3 - Variáveis e combinações dos ensaios.

| Ensaio | I <sub>m</sub> (A) | F (Hz) | V <sub>s</sub> (mm/min.) | DBCP (mm) | Ensaio | I <sub>m</sub> (A) | F (Hz) | V <sub>s</sub> (mm/min.) | DBCP (mm) | Ensaio | I <sub>m</sub> (A) | F (Hz) | V <sub>s</sub> (mm/min.) | DBCP (mm) |
|--------|--------------------|--------|--------------------------|-----------|--------|--------------------|--------|--------------------------|-----------|--------|--------------------|--------|--------------------------|-----------|
| 1      | 170                | 18,18  | 300                      | 30        | 4      | 200                | 20,00  | 300                      | 35        | 7      | 230                | 22,22  | 300                      | 40        |
| 2      | 170                | 22,22  | 350                      | 40        | 5      | 200                | 18,18  | 350                      | 30        | 8      | 230                | 20,00  | 350                      | 35        |
| 3      | 170                | 20,00  | 400                      | 35        | 6      | 200                | 22,22  | 400                      | 40        | 9      | 230                | 18,18  | 400                      | 30        |

Fonte: Autoria própria.

### III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A “Tabela 4” apresenta os dados coletados para análise, onde sinais de corrente, tensão e potência foram estatisticamente avaliados, com geração de valores médio, além de caracterização do sinal pulsado.

Tabela 4 - Combinação de parâmetros para realização dos ensaios.

| Nº                | I <sub>m</sub> [A] | f <sub>p</sub> [Hz] | v [mm/min] | DBCP [mm] | I média [A]        | V média [volts] | P média [Kw] | L [mm] | R [mm] |
|-------------------|--------------------|---------------------|------------|-----------|--------------------|-----------------|--------------|--------|--------|
| Valores ajustados |                    |                     |            |           | Resultados obtidos |                 |              |        |        |
| 1                 | 170                | 23,26               | 300        | 30        | 159,491            | 30,865          | 4,966        | 8,69   | 4,55   |
| 2                 | 170                | 26,32               | 350        | 35        | 150,388            | 33,925          | 5,132        | 8,03   | 4,16   |
| 3                 | 170                | 30,30               | 400        | 40        | 153,843            | 33,655          | 5,095        | 9,05   | 3,33   |
| 4                 | 200                | 23,26               | 350        | 40        | 178,085            | 35,961          | 6,402        | 10,17  | 3,68   |
| 5                 | 200                | 26,32               | 400        | 30        | 186,209            | 34,078          | 6,288        | 9,72   | 3,30   |
| 6                 | 200                | 30,30               | 300        | 35        | 176,342            | 35,839          | 6,335        | 10,87  | 4,10   |
| 7                 | 230                | 23,26               | 400        | 35        | 200,334            | 39,910          | 8,048        | 9,90   | 3,33   |
| 8                 | 230                | 26,32               | 300        | 40        | 191,882            | 42,101          | 8,127        | 11,49  | 3,51   |
| 9                 | 230                | 30,30               | 350        | 30        | 207,272            | 36,241          | 7,535        | 10,10  | 3,59   |

Fonte: Autoria própria

A “Tabela 5” apresenta os resultados ANOVA para um intervalo de confiança de 95%, referentes aos ensaios para cada uma das variáveis de influência apresentados na “Tabela 2”, confirmando ou não se cada variável afetou individualmente nos resultados obtidos. Portanto, com distribuição de probabilidade F-Snedecor (também conhecida como distribuição de Fisher) quando o p-valor é menor que 0,05 (5%), podemos afirmar que esta variável (fator) individualmente afetou a variável de resposta de interesse. Quanto menor o resultado da ANOVA, ou seja, mais próximo de zero a variável de influência afetou mais a variável de resposta.

Tabela 5 – Análise de Variância (ANOVA) para as variáveis de resposta (p-valor).

| <b>Fator</b>                     | <b>I<sub>m</sub></b> | <b>V<sub>m</sub></b> | <b>P<sub>m</sub></b> | <b>L</b>     | <b>R</b>     |
|----------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|--------------|--------------|
| Corrente Média (A)               | <b>0,000</b>         | <b>0,000</b>         | <b>0,000</b>         | <b>0,000</b> | <b>0,000</b> |
| Frequência da Pulsação (Hz)      | 0,946                | 0,426                | <b>0,047</b>         | 0,706        | 0,094        |
| Velocidade de Soldagem (mm/min.) | <b>0,026</b>         | 0,480                | 0,975                | <b>0,043</b> | <b>0,000</b> |
| Distância Contato Bico Peça (mm) | <b>0,000</b>         | <b>0,000</b>         | <b>0,002</b>         | 0,058        | <b>0,014</b> |

Fonte: Autoria própria.

Observamos na “Tabela 5” da Análise de Variância que a corrente média afetou todas as variáveis de resposta (corrente média, tensão média, potência média, largura e reforço,  $\alpha = 0,000$ ). A frequência de pulsação afetou somente a potência média ( $\alpha = 0,047$ ).

A velocidade de soldagem não afetou a tensão média e a potência média, porém afetou a corrente média ( $\alpha = 0,026$ ), a largura ( $\alpha = 0,043$ ) e intensamente o reforço ( $\alpha = 0,000$ ). A Distância Bico de Contato Peça (DBCP) não afetou somente a largura, porém afetou a potência média ( $\alpha = 0,002$ ), o reforço ( $\alpha = 0,014$ ) e com maior intensidade a corrente média e a tensão média ( $\alpha = 0,000$ ).

Através da Análise de Variância (ANOVA) da “Tabela 5” dos resultados obtidos, obtêm-se as seguintes equações de regressão de primeira ordem das variáveis de resposta (corrente média, tensão média, potência média, largura e reforço), e as mesmas são apresentadas pelas equações 2 a 6, onde I<sub>m</sub> é a Corrente Média; F<sub>p</sub> a Frequência de Pulsação; v é a Velocidade de Soldagem e DBCP é a Distância Bico de Contato Peça.

$$I_m = 46,2 + 0,7543.I_m + 0,017.F_p + 0,0422.v - 0,973.DBCP \quad (2)$$

$$V_m = 4,56 + 0,1109.I_m - 0,0633.F_p - 0,00397.v + 0,3524.DBCP \quad (3)$$

$$P_m = -3,351 + 0,04726.I_m - 0,0232.F_p - 2,5 \times 10^{-5}.v + 0,0274.DBCP \quad (4)$$

$$L = 1,49 + 0,03172.I_m + 0,03172.F_p - 0,00792.v + 0,1222.DBCP \quad (5)$$

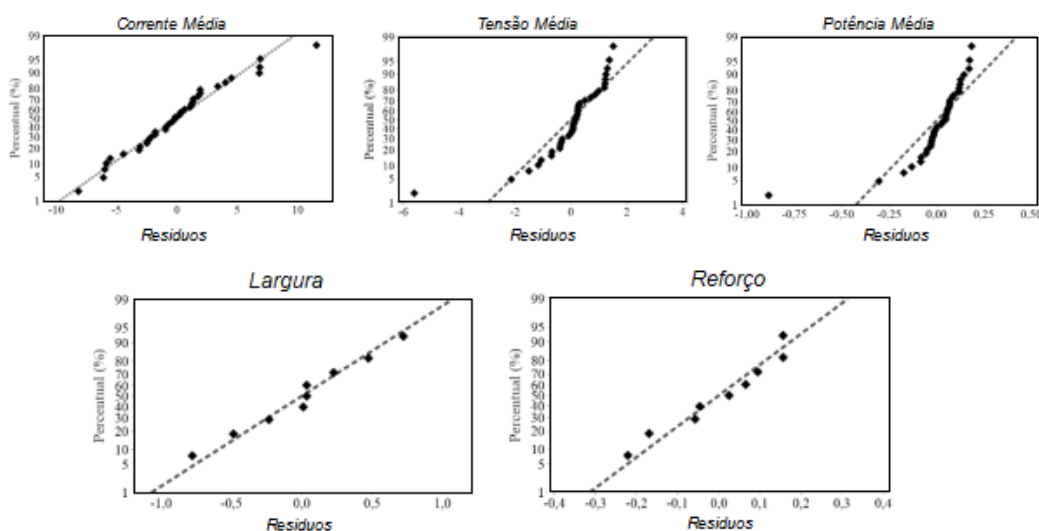
$$R = 10,748 - 0,00894.I_m - 0,0484.F_p - 0,00735.v - 0,0511.DBCP \quad (6)$$

Na comprovação dos resultados dos modelos matemático das equações 2 a 6 foi realizada a Análise de Resíduos representado através do quantil de probabilidade esperado se a distribuição fosse normal em função dos resíduos (Normal Q-Q Plot). Se os erros possuírem distribuição Normal, todos os pontos dos gráficos devem posicionar-se próximos a uma reta.

A “Figura 3” representa o gráfico de probabilidade normal dos resíduos para as variáveis de resposta corrente média, tensão média, potência média, largura e reforço. A

distribuição dos resíduos próximos à reta normal de todas as variáveis de resposta indica o comportamento esperado dos resíduos, ou seja, sem valores com elevada dispersão e seguindo tendência normal, satisfazendo os pressupostos dos resíduos, validando o modelo teórico para futuras predições.

Figura 3 - Probabilidade normal dos resíduos para as variáveis: corrente média, tensão média, potência média, largura e reforço.



Fonte: Autoria própria.

A “Tabela 6” apresenta o sumário dos modelos de regressão, complementando os resultados da Análise de Variância (“Tabela 5”) e os gráficos dos resíduos (Figura “3”). Na “Tabela 6” são apresentados os valores de desvio padrão (S),  $R^2$  representa a porcentagem de variação na resposta que é explicado pelo modelo,  $R^2$  ajustado (aj.) é a porcentagem de variação na resposta pelo modelo, O  $R^2$  predito é calculado com uma fórmula que é equivalente à remoção sistemática de cada observação do conjunto de dados, estimando a equação de regressão e determinando se o modelo faz (ou não) uma boa predição da observação removida.

Tabela 6 - Sumário resumido dos modelos de regressão das variáveis de resposta.

| Modelos | S      | $R^2$  | $R^2$ (aj.) | $R^2$ (pred.) |
|---------|--------|--------|-------------|---------------|
| $I_m$   | 4,4358 | 95,91% | 94,93%      | 93,91%        |
| $V_m$   | 1,3583 | 85,54% | 83,68%      | 81,51%        |
| $P_m$   | 0,1942 | 97,66% | 97,36%      | 97,01%        |
| Largura | 0,6103 | 74,86% | 67,12%      | 53,78%        |
| Reforço | 0,1878 | 86,27% | 82,05%      | 71,49%        |

$I_m$  = corrente média;  $V_m$  = tensão média;  $P_m$  = Potência média.

Fonte: Autoria própria.

Observamos que os valores do desvio padrão (S) de cada variável de resposta, medido nas unidades da variável. Na corrente média ( $I_m$ ) o desvio padrão foi de 4,4358A, na voltagem média ( $V_m$ ) foi de 1,3583V, na potência média ( $P_m$ ) foi de 0,1942Kw, na largura de 0,6103mm e no reforço de 0,1878mm. O  $R^2$  determina se o modelo ajusta bem os dados e quanto mais alto este valor melhor o modelo representa seus dados. Verificamos que na “Tabela 6 os valores dos sinais elétricos foram 85,54% ( $V_m$ ), 95,91% ( $I_m$ ) e 97,66%

( $P_m$ ) e os valores da largura (74,86%) e o reforço (86,27%). Os resultados de  $R^2$  mostram que somente o desvio padrão (S) não é suficiente para determinar conclusões das equações de regressão, e que na largura do cordão o menor  $R^2$  também foi o maior desvio padrão comparado com o reforço que o  $R^2$  foi de 86,27%. Nos sinais elétricos (corrente média, tensão média e potência média) obtivemos valores acima de 85,54% validando a confiabilidade para o uso de tais modelos, onde (MORENO *et al.* 2023) avaliaram anteriormente.

Outrossim, quatro dos cinco modelos da Tabela 6 apresentaram bons ajustes, pois os valores de  $R^2$  (adj.) foram superiores a 80%, pois apenas para a largura o ajuste obtido foi de 67,12%, não foi considerado ajuste excelente, porém aceitável.

Com isso adotamos a remoção dos termos não significativos ao aumento do valor de  $R^2$  (adj.) com alto desvio S dos modelos como (BARROS, 2018) analisou em seu trabalho.

O  $R^2$  ajustado é a porcentagem de variação na resposta que é explicada pelo modelo, ajustada para o número de preditores do modelo com o número de observações, sendo uma medida de ajuste (precisão do modelo) corrigida para modelos lineares, ou seja, a porcentagem de variância onde  $R^2$  ajustado é sempre menor ou igual a  $R^2$ .

O  $R^2$  predito é calculado com uma fórmula que é equivalente à remoção sistemática de cada observação do conjunto de dados, estimando a equação de regressão e determinando se o modelo faz (ou não) uma boa predição da observação removida.

Porém na “Tabela 6” observamos que os valores encontrados de  $R^2$  ajustado e predito estão menores que  $R^2$ , e que nos sinais elétricos a variação é menor que na largura e reforço. As maiores variações do  $R^2$  ajustado e previsto em relação ao  $R^2$  na largura e reforço talvez possam ser atribuídas aos ruídos aleatórios do processo de soldagem. Tanto o  $R^2$  ajustado quanto o  $R^2$  predito proporcionam informações que ajudam a avaliar o número de preditores no modelo.

Como o estudo visou resultados numéricos baseados nos sinais de corrente e tensão, a morfologia dos cordões não foram minuciosamente analisadas. Tais análises foram melhor detalhadas por Moreno *et al.* (2022) em estudos da estrutura cristalina dos cordões e na ZTA.

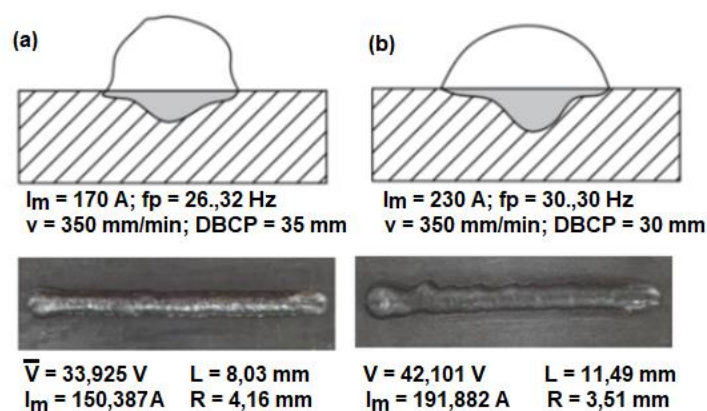
Nas análises dos resultados deste trabalho, a largura e o reforço dos cordões de revestimento por ensaio, mostraram um valor de 11,49 mm para a largura, para o reforço um valor de 3,51 mm ( $I_m=230A$ ;  $f_p=26,32Hz$ ;  $v=300mm/min$ ;  $DBCP=40mm$ ), como também notado por Filho *et al.* (2017), Nascimento e Pukasiewicz (2016) e Guimarães (2020).

Por sua vez, na “Figura 4” mostramos a geometria ilustrativa (medição média) dos cordões realizados, onde o comportamento de maior e menor valores da largura, onde nota-se uma relação diretamente proporcional entre a largura e a corrente média. Este comportamento era esperado, haja vista que o aumento de corrente implica em maior taxa de calor no processo e, conseqüentemente, maior deposição de material na poça de fusão.

A dependência da largura com a variação da DBCP também é notável e já teve sua influência notada por Filho *et al.* (2017), onde o aumento desta distância provoca conseqüente aumento na distância para abertura de arco (comprimento de *stick-out*), fazendo com que a gota tenha de percorrer maior distância até chegar a poça de fusão.

Figura 4 - Ilustração das morfologias dos cordões com menor (a) e maior (b) larguras.





Fonte: Autoria própria.

#### IV. CONCLUSÕES

O software ANOVA auxiliou na extração de resultados, levando a quantificar as inter-relações para métricas existentes. Os modelos matemáticos gerados podem futuramente servir de base para configuração de processos, aumentando a chance de sucesso na obtenção de características de geometria de cordões mais regulares.

A relação da corrente e tensão com a largura e reforço estiveram sempre controlados, pois os resultados dos valores de  $R^2$  e  $R^2$  (adj.) da regressão linear mostraram-se bastante próximos, o que valida mais a confiabilidade para o uso de tais modelos para estudos estatísticos destes processos.

Entretanto, os modelos matemáticos gerados para as variáveis de respostas de interesse como: corrente média ( $I_m$ ), voltagem média ( $V_m$ ), potência média ( $P_m$ ) e reforço constituem-se em dados de alta confiabilidade, visto que apresentaram excelentes ajustes: 94,93%, 83,68%, 97,36% e 82,05% respectivamente, apesar da largura ter tido um erro devido ao desvio padrão, aceitável.

Portanto, os modelos finais desenvolvidos são expressões de grande confiabilidade, pois todos eles apresentaram ajustes superiores a 80%.

Com isso, os dados desta deposição foram muito importantes, pois foram obtidos uma maior largura 11,49 mm na corrente média de 230 A, bem como velocidade de soldagem de 300 mm/min, distancia bico de contato peça de 30mm e frequência de pulsação de 30,30Hz, suficientes para um recobrimento bem definido.

#### V. REFERÊNCIAS

AMERICAN WELDING SOCIETY. AWS A5.29/A5.29M: Specification for low-alloy steel electrodes for flux cored arc welding. 6. ed. Danvers, MA, 2022.

BIAO, C. *et al.* Approximate entropy a new statistic to quantify arc and welding process stability in short-circuiting gas metal arc welding. **Chinese Physics B**, v. 17, nº 3, p. 865, 2008.

BARROS, N. F. **Otimização dos parâmetros de soldagem a ponto por resistência elétrica do aço 22MnB5 para aplicação no setor automotivo**. 195 p. Dissertação Mestrado - Universidade Federal de Itajuba; Itajuba - MG, 2018, Disponível: <https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/handle/123456789/1882>

CORREA, C. A. **Uma contribuição ao processo de soldagem de revestimento com arame tubular pulsado de um aço CA6NM aplicando o método Taguchi**. 120 p. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas/SP, doi: 10.47749/T/UNICAMP.2018.995620; 2018.

DÍAZ, V. V.; ACEVEDO, F. F.; CUNHA, T. V. Uma contribuição na determinação das variáveis da corrente contínua pulsada para o arame tubular E71T-1M. **Soldagem & Inspeção**, v. 23, nº3, p. 340–349, doi: 10.1590/0104-9224/SI2303.04; 2018

ESAB. **Selecting the Mode of Transfer**. Disponível em: <<https://www.esabna.com/us/en/news/newsletters/july-2013>>.

FARIAS, J. P. **Magnésio metálico como componente do revestimento na soldagem com eletrodos ao C-Mn-Ni**. 244 p. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis/SC, 1993. Disponível: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/157778>.

FILHO, A. J. B. **Análise dos parâmetros da polaridade negativa na curva de corrente de soldagem MIG/MAG polaridade variável aplicados à soldagem para revestimento**. 91 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RG, 2017. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/163419>.

GHOSH, P. K. **Pulse current gas metal arc welding: Characteristics, control and applications**. Singapore: Springer, ISSN 2195-092X. ISBN 978-981-10-3557-9, 2017.

GUIMARÃES, J. B. **Estudo dos parâmetros de soldagem em um revestimento de aço martensítico 410 NiMo pelo processo FCAW pulsado utilizando modelos de regressão**. 99 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Cornélio Procópio/PR, 2020. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/5427>.

HERINGER, D. A. & LINCOLN, P. R. P.A.; Utilização da Soldagem por Arame Tubular no Processo de Manufatura Mecânica; **Revista Mecânica**; <http://dx.doi.org/10.35265/2236-6717-232-12585>, Fortaleza-CE. Ed.232(11), 2023.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. 1ªed. 546p. São Paulo/SP: LTC, 2005.

MORENO, J.R.S.; FERREIRA, J.G.; CORREA, C.A.; LIZZI, E.A.S.; “Avaliação de Sinais Elétricos e Aceleração em Revestimento Gerados pelo Processo de Soldagem com Arame Tubular Pulsado” **Revista Sodebras [on line]**, v.18 (215); doi: <http://doi.org/10.29367/issn.1809-3957.18.2023.215.73>; 2023

MORENO, J.R.S., CONDE F.F, CORREA, C. A., BARBOSA, L.H., SILVA, E.P., AVILA, J., BUZOLIN, R.H. and PINTO, H.C.; Pulsed FCAW of Martensitic Stainless Clads onto Mild Steel: Microstructure, Hardness, and Residual Stresses; **Materials**, 15(8), 2715; <https://doi.org/10.3390/ma15082715>, 2022

NASCIMENTO, G. M. S.; PUKASIEWCZ, A. G. M. Análise do processo de deposição FCAW de uma liga de carboneto de cromo aplicando o planejamento experimental central composite circumscribed. **Soldagem & Inspeção**, v. 21, nº4, p. 444–455, doi: 10.1590/0104-9224/SI2104.05; 2016.

NEVES, A. C. *et al.* Study of arc welding stability in flux cored arc welding process and pulsed continuous current. **Welding International**, Taylor & Francis, v. 35, n. 4-6, p. 158–169, 2021. doi: 10.1080/09507116.2021.1971936.

PUNALES, E.M.M. & ALFARO, S. C. A., Stability on the GMAW Process; **Welding: Modern Topics**. 49p. London/UK: IntechOpen, doi: 10.5772/intechopen.90386; 2021

REZENDE, G. M. C. d. *et al.* Um critério para determinar a regulação da tensão em soldagem MIG/MAG por curto-circuito. **Soldagem & Inspeção**, SciELO Brasil, v.16, nº 2(98–103), 2011.

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V.; LUCAS, W. A scientific application oriented classification for metal transfer modes in GMA welding. **Journal of Materials Processing Technology**, v.212 (406–1413); doi:10.1016/j.jmatprotec.2012.01.021; 2012.

SOUSA, J. M. S. d.; LOBATO, M. Q.; GARCIA, D. N. Abrasion resistance of Fe-Cr-C Coating deposited by FCAW welding process; **Wear**, v.476 (1-12), doi: 10.1016/j.wear.2021.203688; 2021.

ZHANG, Y. *et al.*; Correlation analysis of penetration based on keyhole and plasma plume in laser welding. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 256(1-12), doi: 10.1016/j.jmatprotec.2018.01.032; 2023.

## VI. COPYRIGHT

Direitos autorais: Os autores são os únicos responsáveis pelo material incluído no artigo.