

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE PROCESSO NA QUALIDADE DE REVESTIMENTOS DE ALUMÍNIO DEPOSITADOS POR ASPERSÃO TÉRMICA POR ARCO ELÉTRICO

Edmilson Gualdezi, egualdezi@gmail.com¹

Vitor Vargas Santos, vitvargas12@gmail.com¹

Alexandre Maier Eurich, alexandre.eurich@unicesumar.edu.br¹

¹UniCesumar, Rua: Desembargador Westphalem, 60 - Oficinas, Ponta Grossa - PR, 84036-350

Resumo. Este estudo investiga a influência de parâmetros operacionais na formação de revestimentos de alumínio aplicados sobre o aço SAE 1020, liga metálica de baixo carbono, por meio do processo de aspersão térmica a arco elétrico. A pesquisa tem como foco a análise das propriedades microestruturais e mecânicas dos revestimentos, visando à otimização do desempenho funcional. Foram avaliados diferentes padrões de deposição, variando-se a velocidade de avanço, a distância da pistola ao substrato e o padrão de passe. As amostras foram caracterizadas por meio de análise morfológica, ensaio de microdureza Vickers, inspeção visual após dobramento, além de medidas de espessura e avaliação de porosidade. Amostras com padrão de deposição a 180°, particularmente as de múltiplos passes, apresentaram menor fração de poros, melhor uniformidade e maior integridade mecânica, conforme validado pela norma Petrobras N-2568. Conclui-se que a escolha adequada dos parâmetros de processo é fundamental para a obtenção de revestimentos metálicos de alta qualidade e com desempenho satisfatório em aplicações industriais.

Palavras chave: Aspersão Térmica, Arco Elétrico; Revestimento; Alumínio; Parâmetros de Processo.

Abstract. This study investigates the influence of operational parameters on the formation of aluminum coatings applied to SAE 1020 steel, a low-carbon metallic alloy, using the electric arc thermal spray process. The research focuses on the analysis of the microstructural and mechanical properties of the coatings, aiming to optimize functional performance. Different deposition patterns were evaluated by varying the travel speed, the standoff distance, and the spraying path pattern. The samples were characterized through morphological analysis, Vickers microhardness testing, visual inspection after bending, as well as thickness measurements and porosity evaluation. Samples sprayed with a 180° pattern, particularly those produced with multiple passes, exhibited lower porosity, better uniformity, and superior mechanical integrity, in accordance with Petrobras standard N-2568. It is concluded that the proper selection of process parameters is essential for achieving high-quality metallic coatings with satisfactory performance in industrial applications.

Keywords: Thermal Spray, Arc Electric, Coating, Aluminium, Process Parameters.

1. INTRODUÇÃO

A aplicação de revestimentos para modificar e aprimorar as propriedades superficiais de materiais tem se tornado uma estratégia essencial para aumentar a vida útil de componentes, reduzindo custos de substituição e manutenção. Nesse contexto, a tecnologia de aspersão térmica se destaca como uma solução para melhorar as suas propriedades, proporcionando resistência ao desgaste, à corrosão e/ou a outros mecanismos de falha. A aspersão térmica “thermal spray” é uma tecnologia composta de diversos processos (que se distinguem principalmente pela fonte de energia térmica), nos quais as partículas aspergidas, em condição fundida ou parcialmente fundida, são depositadas, camada a camada, sobre a superfície de um substrato devidamente preparado, formando uma espessura de revestimento. As partículas são devidamente aquecidas e aceleradas; devido ao impacto com o substrato, se achatam e, ao se resfriar, aderem às irregularidades da superfície, dando origem a uma camada de estrutura típica lamelar, chamada panqueca, diferente de qualquer outra forma metalúrgica. Essa estrutura típica apresenta inclusões de óxidos, vazios e porosidade (RODRIGUEZ, 2003).

Dentre os métodos de aspersão térmica, a aspersão por arco elétrico apresenta vantagens como alta taxa de deposição, custo reduzido, além da facilidade em operação em campo. Neste processo, dois arames metálicos são alimentados continuamente e fundidos por um arco elétrico gerado entre eles, enquanto um fluxo de ar atomiza e projeta as partículas fundidas sobre o substrato. No entanto, há a dependência direta de parâmetros operacionais com a qualidade do revestimento, caracterizada pela morfologia do revestimento, aderência, microdureza e presença de defeitos estruturais, como fração de óxidos e poros. A velocidade de alimentação do arame e a distância entre a pistola e o substrato exercem forte influência na qualidade do revestimento, afetando características como a aderência, a porosidade e a oxidação. O

ajuste inadequado desses parâmetros pode comprometer a formação adequada das lamelas e, conseqüentemente, a integridade do revestimento (SILVA, 2017).

Deste modo, a presente pesquisa investiga a influência de parâmetros operacionais na formação dos revestimentos de alumínio aplicados sobre o um substrato de aço SAE 1020, liga metálica de baixo carbono amplamente utilizada no cenário industrial. O processo de aspersão térmica utilizado foi o arco elétrico e a análise se baseou na análise de microdureza, aderência e morfologia para otimização do desempenho.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura 1 apresenta um fluxograma com as etapas conduzidas ao longo da pesquisa, incluindo a preparação dos corpos de prova (amostras), bem como os ensaios realizados. As atividades experimentais foram realizadas no laboratório REV SOLDA, pertencente ao Lactec-LEME.

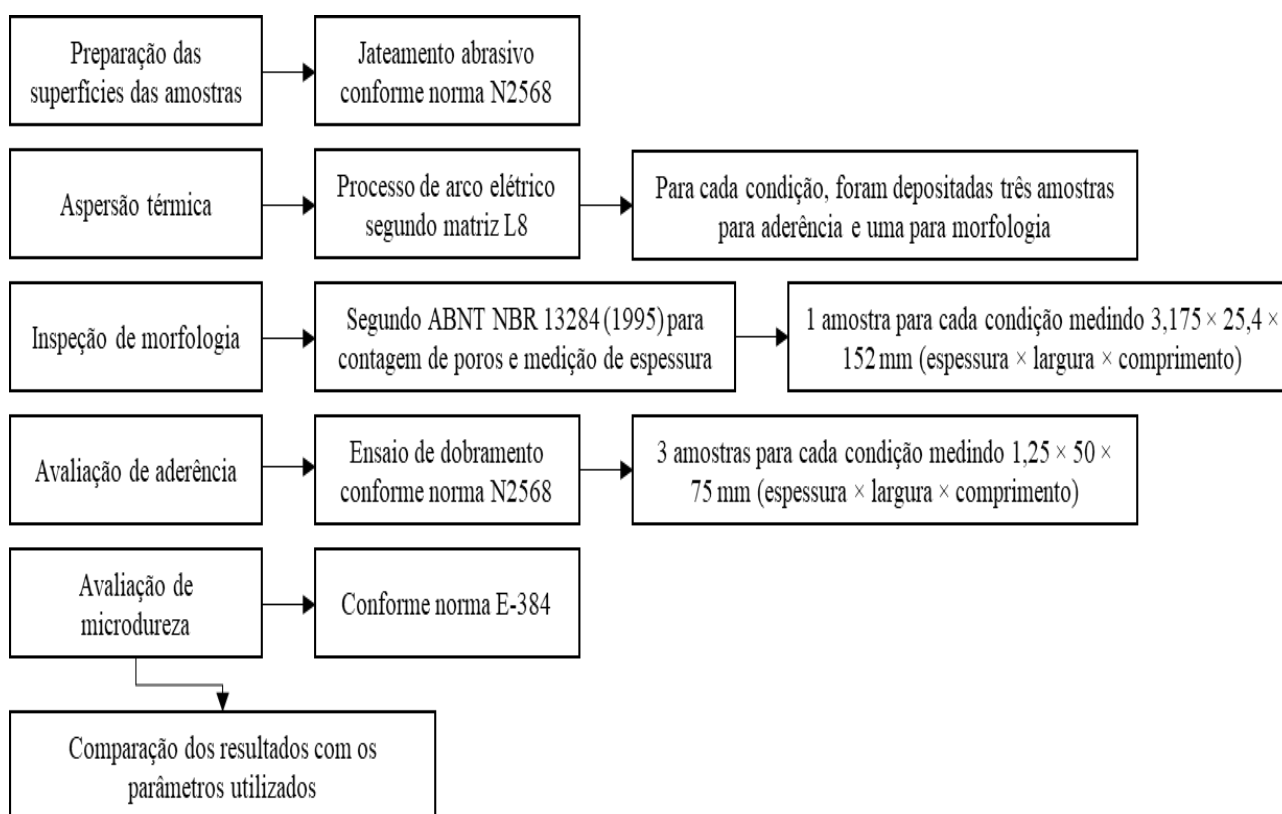


Figura 1. Fluxograma de etapas para o processo de Aspersão Térmica por Arco Elétrico.

Com base no que pode ser visto na Figura 1, as amostras, de aço carbono SAE 1020, foram aspergidas por arco elétrico com base em uma matriz experimental L8 e posteriormente avaliados da seguinte maneira: quanto à morfologia (conforme ABNT NBR 13284 (1995)) para contagem de poros e avaliação de espessura; quanto à aderência por ensaio de dobramento e; quanto à microdureza.

Em relação à preparação de superfície, as mesmas foram submetidas a jateamento abrasivo, com o objetivo de gerar uma rugosidade média (R_a) acima de $5,0 \mu\text{m}$. A verificação da rugosidade foi realizada por meio de rugosímetro da marca Mitutoyo, modelo RJ-210 e todas as amostras atingiram tal valor. O procedimento de preparação foi executado em cabine de jateamento da marca Blastibrás, utilizando-se como abrasivo o óxido de alumínio (Al_2O_3) ALR30 ANSI, a uma distância de aproximadamente 150 mm e sob uma pressão de trabalho de 6 bar, realizando-se seis (6) passadas no sentido longitudinal. Ressalta-se que o tratamento foi aplicado apenas em uma das faces das amostras, conforme especificado na norma ABNT NBR 7348:2017.

Já para o processo de aspersão térmica, foi realizado por meio do processo de aspersão térmica a arco elétrico, utilizando o equipamento Metallisation Arcspray 140, acoplado a uma pistola da mesma marca, com operação assistida por um braço robótico da marca KUKA. O arame utilizado como material de adição foi de alumínio, o 71642 FL 1,6 mm, marca Lincoln Electric. A execução das atividades foi realizada conforme uma matriz experimental L8, exposta na Tabela 1.

Tabela 1. Matriz experimental utilizada.

Número da amostra	Padrão de aplicação	Velocidade (mm/s)	Distância (mm)	Tensão (V)	Corrente (A)	Passes
1	90°	380	150	30	230	2
2	90°	380	200	30	230	2
3	90°	500	150	30	230	2
4	90°	500	200	30	230	2
5	180°	380	150	30	230	4
6	180°	380	200	30	230	4
7	180°	500	150	30	230	4
8	180°	500	200	30	230	4

Conforme pode ser observado na matriz da Tabela 1, há dois tipos de padrão de deposição: 90° e 180°. Para isto, foi necessário o desenvolvimento de duas programações para o robô: uma para a realização de passes de 90°, ou cruzados, conforme Figura 2 (a) e; outra para os passes de 180°, ou horizontais, conforme Figura 2 (b). Além do mais, para que o tempo de deposição fosse o mesmo para todas as condições, determinou-se dois passes para as condições a 90° e 4 passes para as condições a 180°.

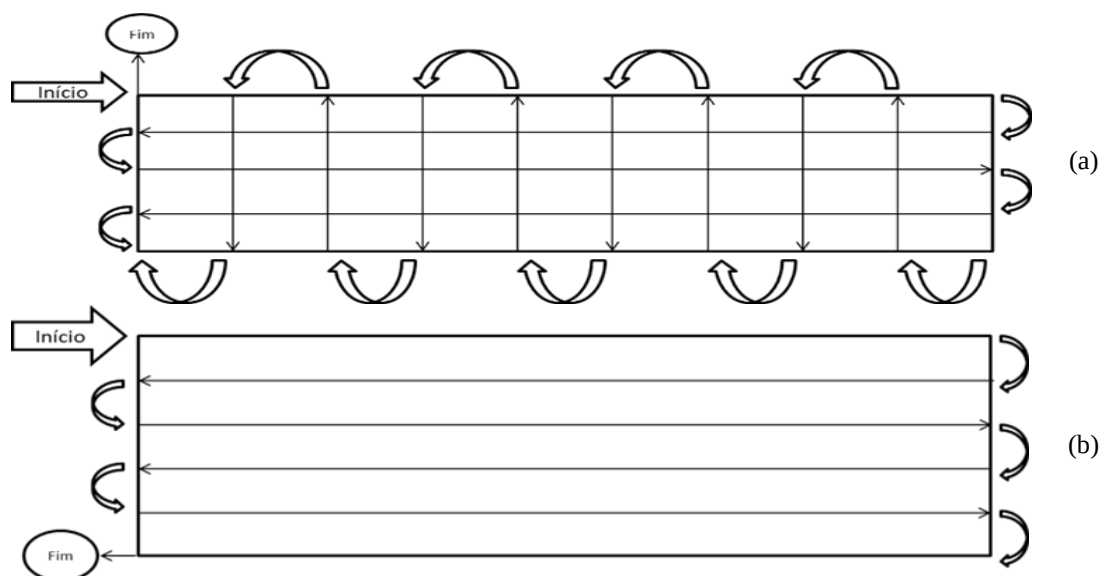


Figura 2. Padrão de deposição com passes a 90° (a) e com passes a 180° (b).

2.1. Ensaio de Dobramento.

Com o intuito de avaliar a resistência a aderência dos revestimentos aspergidos, as três amostras de cada uma das condições foram submetidas a ensaios de dobramento; no total foram avaliados 24 corpos de prova. O procedimento adotado foi conforme a norma Petrobrás N-2568 (2011), utilizando, inclusive, o mesmo equipamento descrito e com um avanço lento.

2.2. Análise Morfológica dos Revestimentos

Para a realização das análises morfológicas, os corpos de prova foram preparados conforme a norma ABNT NBR 13284 (1995), seguindo as etapas de corte metalográfico, embutimento, lixamento e polimento.

O corte metalográfico foi realizado com a utilização de um equipamento Arocor 300, do fabricante Arotec, com rotação média de 2.500 RPM. O corte foi realizado na direção transversal das amostras, resultando em dimensões finais 5 mm de comprimento e 25,4 mm de largura, adequadas para o processo subsequente de embutimento. É importante salientar ainda que o corte sempre foi realizado comprimindo o revestimento para mitigar a possibilidade de deslocamento durante o processo. Já o embutimento foi realizado a quente, com baquelite, utilizando uma embutidora automática PRE30 do fabricante Arotec.

O lixamento e o polimento foram realizados com uma politriz Arotec Aropol VV-PUR e uma politriz Arotec Aropol E, respectivamente. As lixas utilizadas eram de carbeto de silício e foram utilizadas as granulações de 220, 320, 600 e

1200, nesta sequência. Cabe ressaltar ainda que à medida que a lixa era trocada para uma granulometria menor, a amostra era rotacionada em 90°. Para o polimento, por sua vez, foi utilizado suspensão de diamante policristalina *Schneider Diapoly* SGB de 3 µm e suspensão de sílica coloidal de 0,05 µm, rotação de 200 e 150 rpm. A suspensão foi aplicada sobre uma boina de polimento umedecida.

Após estas etapas serem realizadas, as amostras foram avaliadas por microscopia óptica (BX51M do fabricante *Olympus* e *software AnalySIS*) e por microscopia eletrônica de varredura (Vega 3 do fabricante *TESCAN*). A microscopia óptica foi importante para uma análise geral dos revestimentos, assim como a medição de espessura de cada uma das amostras. Já a microscopia eletrônica de varredura se fez importante para a avaliação de poros, conforme norma ISO 14923:2003.

2.3. Avaliação de Microdureza

Foram realizadas medições de microdureza Vickers, segundo norma ASTM E384-22 (2022), utilizando um equipamento do fabricante Emcotest modelo DuraScan 20. Foi utilizado um indentador piramidal de diamante base quadrada, com ângulos de face de 136°, com aplicação de carga de 0,05 kgf. Cabe ressaltar que foram realizadas cinco medições ao longo do revestimento e espaçadas a 5 mm cada indentação. O equipamento utilizado é capaz de medir a diagonal da indentação e fornece automaticamente o valor de dureza HV.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 2 expõe os valores de espessura e de fração de poros para cada uma das amostras avaliadas, conforme matriz exposta na Tabela 1. O valor de desvio padrão da espessura é utilizado neste caso para qualificar a não uniformidade do revestimento ao longo da seção transversal do corpo de prova.

Tabela 2. Resultado da análise de espessura e contagem de fração de poros.

Número da amostra	Média da espessura de revestimento (µm)	Desvio padrão da espessura(µm)	Fração de poros (%)
1	405,30	26,615	5,74
2	435,09	41,068	4,46
3	432,61	16,98	4,26
4	367,51	15,398	5,76
5	327,49	26,599	2,80
6	270,38	22,999	5,04
7	186,51	11,718	3,18
8	220,86	35,039	4,46

Ao analisar os valores expostos na Tabela 2, nota-se um compromisso entre a espessura e, principalmente, os padrões utilizados nas deposições. Neste caso, os padrões de 90° proporcionaram revestimentos com maiores espessuras e as amostras 5 e 7 apresentam menores frações de defeito (caracterizado, neste caso, pelos poros). Além do mais, observa-se que velocidades e distancias menores proporcionam revestimentos mais espessos.

No entanto, com estes resultados, ainda não se pode confirmar, mesmo que de maneira qualitativa qual seria uma condição otimizada do processo.

Uma análise complementar pode ser encontrada na Tabela 3, que expõe os valores de microdureza obtidos nas amostras depositadas.

Tabela 3. Valores de microdureza dos revestimentos das amostras avaliadas.

Amostra	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Medição 4	Medição 5	Média	Desvio
1	50,3	50,9	54,5	52,3	43,5	50,3	2,7
2	32,1	58,6	59,5	53,8	31,6	47,1	12,2
3	56,8	47,5	47,3	47,1	58,9	51,5	5,1
4	48,3	48,9	54,5	35,3	44,5	46,3	5,1
5	61,2	49,01	48,5	38,4	58,9	51,2	7,1
6	56,3	60,6	59,2	54,3	45,4	55,2	4,2
7	43,6	49,8	55,3	45,2	53,6	49,5	4,1
8	62	52,6	24,1	39,9	51,5	46	11,2

Ao se analisar os valores dispostos na Tabela 3, nota-se que não há uma divergência considerável dos valores de microdureza para os corpos de prova avaliados.

Sendo assim, os ensaios de aderência por dobramento se tornam de suma importância. A Figura 3 (a), disposta a seguir, é uma fotografia das amostras 5 e 7 dobradas, assim como suas morfologias obtidas por MEV. Com base na norma da Petrobrás N2568 (2011) ambas as amostras são validadas pelo teste de dobramento, validando os melhores resultados de fração de poros que ambas apresentaram. Para o caso desta pesquisa, os dados coletados das amostras indicam que os parâmetros utilizados nas amostras 5 e 7 foram ideais para o processo de aspersão térmica a arco elétrico, isto porque todas as demais amostras apresentaram trincas ao longo do revestimento após os ensaios de dobramento, conforme é exemplificado, na Figura 3 (b), pelas fotografias das amostras 1 e 4 dobradas, assim como pelas suas morfologias obtidas por MEV.

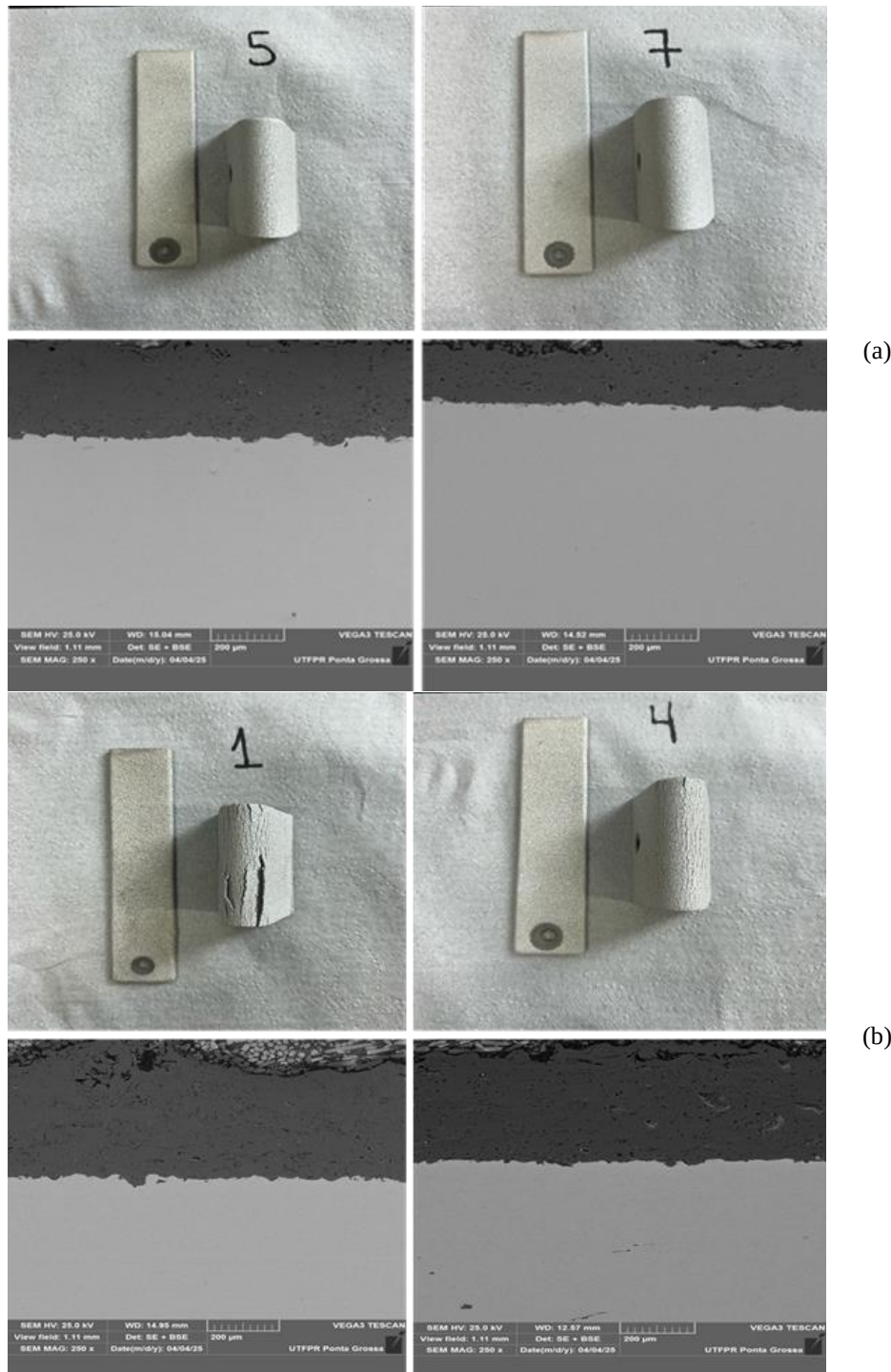


Figura 3. Amostras dobradas e imagens de MEV para: amostras 5 e 7 (a) e; amostras 1 e 4 (b).

O maior teor de poros nas amostras 1 e 4, assim como a espessura demasiada do revestimento pode ajudar a explicar estes resultados de ambas as amostras nos testes de dobramento e, conseqüentemente, correlacionados com os parâmetros de deposição.

4. CONCLUSÃO

Considerando a relevância da otimização dos parâmetros de processo, o presente estudo visou estabelecer os parâmetros ideais para a aplicação de revestimentos por aspersão térmica a arco elétrico sobre o aço SAE 1020 utilizando arame de alumínio. Através de uma análise detalhada da microestrutura, do perfil de microdureza e dos ensaios de dobramento, conclui-se que:

As amostras submetidas ao padrão de aplicação de 90° mostraram-se inadequadas para aplicações que exigem alguma forma de flexão, devido à espessura excessiva do revestimento observada. Este resultado é corroborado pelos dados do ensaio de dobramento, bem como pelo significativo desvio padrão registrado, indicando falta de uniformidade e controle no processo.

Os parâmetros relacionados à velocidade de avanço demonstraram ter a maior influência na variabilidade do processo de aspersão térmica. Ambas as propriedades analisadas, espessura do revestimento e quantidade de porosidade, apresentaram forte correlação com essa variável. A variação da velocidade de avanço resulta em diferenças substanciais nas características do revestimento, impactando a formação de poros e a homogeneidade da espessura. Essa relação destaca a necessidade de um controle rigoroso da velocidade de avanço, especialmente em processos que exigem alta uniformidade e redução de porosidade.

Os ensaios realizados evidenciam que a amostra 7 apresentou os melhores resultados em termos de otimização do processo. Essa amostra obteve o menor desvio padrão registrado, a menor quantidade de porosidade e a espessura de revestimento mais controlada. Além disso, no ensaio de dobramento, a amostra não apresentou quaisquer sinais de deslocamento, evidenciando sua alta aderência, fatores essenciais para aplicações que envolvem deformações mecânicas significativas.

Com base nos parâmetros utilizados, observa-se que embora a variação da presença de poros não tenha resultado significativo na redução da dureza média de revestimento, verificou-se um aumento na dispersão dos valores medidos, evidenciado pelo desvio padrão das amostras que obtiveram os melhores resultados (Amostra 5 e 7).

5. AGRADECIMENTOS

Ao professor e orientador Alexandre Maier Eurich, pela dedicação, disponibilidade, orientação técnica e confiança durante as etapas do desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas do laboratório REVSOLDA, pela colaboração nas atividades experimentais, pelas discussões construtivas e pelo ambiente de trabalho colaborativo. Ao LACTEC-LEME, pela infraestrutura disponibilizada para a realização das análises e ensaios.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para a concretização deste trabalho, nossos sinceros agradecimentos.

6. REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). *NBR 13284:1995 - Preparação de corpos de prova para análise metalográfica - Procedimento*. Rio de Janeiro: ABNT, 1995.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). *NBR 7348:2017 - Materiais metálicos - Ensaio de microdureza Knoop e Vickers*. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- American Society for Testing and Materials (ASTM). *E384-22 - Standard test method for microindentation hardness of materials*. West Conshohocken, PA: ASTM, 2022.
- Petróleo Brasileiro S.A. (Petrobras). *N-2568:2011 - Revestimentos metálicos aplicados por aspersão térmica - Requisitos*. Rio de Janeiro: Petrobras, 2011.
- Rodriguez, r. M. H. P. *Formação de óxidos nos revestimentos de alumínio depositados por aspersão térmica*. 2003. 118 f. Tese (doutorado em engenharia) – universidade federal do paraná, curitiba, 2003.
- Silva, I. F.; andrade, d. A.; pereira, t. M. *Parâmetros de processo na aspersão térmica a arco elétrico: influência na microestrutura e nas propriedades do revestimento*. Revista m teria, v. 22, n. 3, p. E11838, 2017.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.