



Avaliação do forjamento de um aço carbono revestido com liga de aço inoxidável 316L por aspersão térmica arc spray

Alexandre Milanez¹

Jamile Thön Langbehn²

Natália Ribeiro dos Santos³

Ana Carolina Tassi Junkoscki⁴

Luiz Carlos de Cesaro Cavaler⁵

Resumo: O revestimento de superfícies por aspersão térmica Arc Spray é utilizado na indústria para modificar a superfície de materiais visando melhorar propriedades mecânicas, tribológicas e de corrosão. O objetivo desse trabalho é revestir um aço carbono 1045 com aço inoxidável 316L por aspersão térmica Arc Spray e posterior forjamento a quente, buscando o caldeamento do revestimento no aço de base. Foi realizada a aspersão térmica por arc spray em barras de aço 1045 aplicando 2 camadas de revestimento. O forjamento foi realizado a quente em temperatura de 1200°C. Os corpos de prova foram caracterizados por metalografia e microdureza. Por meio da metalografia observou-se que houve caldeamento do revestimento no aço base, com uma camada resultante de aproximadamente 0,25mm. A microdureza corroborou com os resultados de metalografia.

Palavras-chave: Forjamento, Aspersão Térmica, Arc Spray, Aço Inoxidável, microestrutura.

1 INTRODUÇÃO

O uso de tecnologias de aspersão térmica é amplamente utilizado na indústria metalúrgica, buscando otimizar as propriedades de um determinado metal ou ainda conferir-lhe características específicas na sua superfície. Dentre as técnicas aplicadas, a aspersão térmica por *arc spray* se destaca perante outras técnicas por seu equipamento simples, facilidade de aplicação e menor custo [1]. Por outro lado, a deposição de determinados revestimentos é um desafio no que se refere a boa adesão

¹ Doutor, Centro Universitário UNISATC. E-mail: alexandre.milanez@satc.edu.br

² Mestre, Centro Universitário UNISATC. E-mail: jamile.thon@satc.edu.br

³ Graduanda, Centro Universitário UNISATC. E-mail: natalia-santos2008@hotmail.com

⁴ Graduanda, Centro Universitário UNISATC. E-mail: anatassijunkoscki@gmail.com

⁵ Doutor, Centro Universitário UNISATC. E-mail: luiz.cavaler@satc.edu.br



da camada metalizada, levando a deslocamentos de material e comprometendo a qualidade final da peça [2].

A corrosão metálica é um problema constante e oneroso para as indústrias ao redor do mundo. Estima-se que cerca de 30% de toda a produção mundial do aço é perdida para a corrosão, o que pode representar até 3% do PIB de determinados países [3]. O uso de aços inoxidáveis é uma das alternativas para mitigar esse problema. Essa classe de aços, que tem alta resistência a corrosão comparada com outros tipos de aço, possui diversas ligas com características específicas para diferentes aplicações [4].

Dentre os processos de conformação de metais, o forjamento se destaca como uma das técnicas mais antigas e é amplamente aplicada para fabricação de peças metálicas. Além de possibilitar a moldagem no formato final desejado, o forjamento melhora as propriedades mecânicas do metal e elimina pequenos defeitos como poros e trincas provenientes do processo de fabricação anterior [5].

Neste estudo uma barra de aço carbono foi metalizada com um aço inoxidável e posteriormente forjada a quente, com o objetivo de promover o caldeamento do revestimento no aço de base. A metalização utilizada por si só não promove uma boa adesão da camada na peça, sendo facilmente removida. Sendo assim, o processo de forjamento a quente se justifica como uma alternativa para melhorar a aderência do revestimento em estudo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A aspersion térmica é uma técnica que possibilita revestir peças metálicas com diferentes materiais, utilizando desde materiais duros para desgaste, até materiais resistentes a oxidação. Tem como objetivo obter peças funcionalizadas que necessitam de determinadas propriedades apenas na superfície. Desta forma, é possível fabricar peças de alto desempenho a partir de ligas metálicas de menor custo [6].

A aspersion térmica consiste em depositar camadas de um determinado material na superfície de um material de base formando um revestimento. Para isto um conjunto de operações é necessário: O material a ser depositado precisa ser aquecido ao ponto de fusão e então acelerado contra a superfície a ser revestida. As

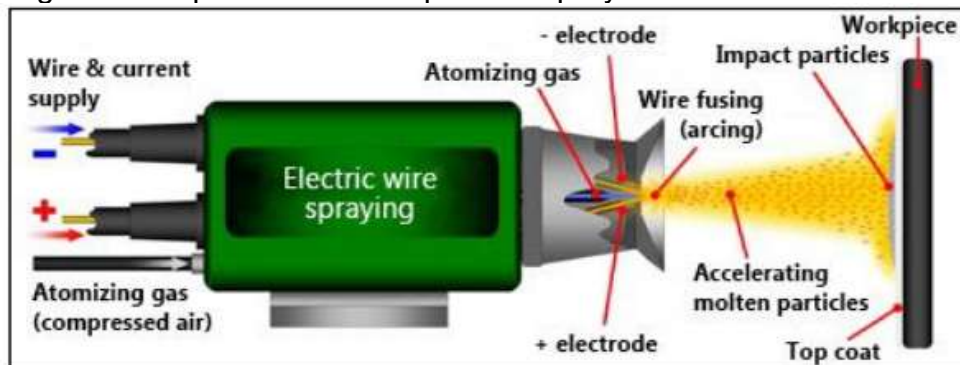
partículas fundidas, ao colidirem com a superfície, ficam aderidas formando o revestimento [7].

Existem diferentes técnicas de aspersão térmica disponíveis no mercado. As variações são relativas à forma de aplicação, equipamentos e tipos de insumos utilizados. Cada técnica possui suas especificidades e, por este motivo, possibilidade de aplicação de diferentes tipos de materiais, diferentes custos de aplicação e qualidade de revestimento [8][9].

2.1 Aspersão térmica por *Arc Spray*

No processo de aspersão térmica utilizando arco elétrico, conhecida como *Arc Spray*, o material de revestimento é utilizado em forma de arame e a fonte de energia para fundir as partículas é um arco elétrico. A Fig. 1 esquematiza o processo de aplicação [6].

Figura 1 - Aspersão Térmica por *Arc Spray*.



Fonte: Adaptado de [6].

Em resumo o processo de *Arc Spray* utiliza dois arames, sendo um polo positivo e outro negativo, que alimentam a máquina durante o processo. Eles passam pela pistola e se encontram no bico onde ocorre a abertura do arco elétrico. O material fundido é acelerado por meio de ar comprimido em direção ao substrato formando o revestimento [10].

Um dos problemas relacionados ao revestimento por aspersão térmica está na presença de defeitos como porosidades, oxidações e falhas de adesão [7]. Diversos trabalhos encontrados na literatura investigam as causas desses defeitos e buscam soluções para reduzir esses problemas [11][12][13].

3 MATERIAS E MÉTODOS

Para a realização do estudo foi utilizado como material de base uma barra de aço ASTM 1045 com 25,4mm de diâmetro seccionada em corpos de prova de 90mm de comprimento. Foram confeccionados 2 corpos de prova. As barras foram previamente jateadas em jato de granalha de aço para aumentar a rugosidade superficial favorecendo a adesão do material aspergido.

A Fig. 2 demonstra a sequência de atividades realizadas no trabalho.

Figura 2 – Esquema das etapas de desenvolvimento do trabalho.



Fonte: do Autor, 2025.

A aspersão térmica por arc spray por realizada utilizando um equipamento Eutectic Castolin modelo Eutronic Arc Spray 4. O material aplicado foi o arame de aço inoxidável 316L com diâmetro de 1,6mm. Foram aplicadas 2 camadas de revestimento.

Para a etapa de forjamento, as peças foram aquecidas a 1200°C em um forno mufla Jung. Essa temperatura foi escolhida baseada na regra utilizada para forjamento a quente considerando a temperatura de fusão da liga [5]. O forjamento foi realizado em uma prensa hidráulica da FKL modelo PHR 150.

Para caracterização dos corpos de prova foi realizado um ensaio de metalografia, onde os corpos de prova foram cortados ao meio para análise da seção transversal e preparados conforme norma ASTM E3, com lixamento utilizando lixas de granulometria 80 a 1200 e polimento em pano de feltro com solução de alumina 1 μ . O ataque químico para revelar a microestrutura foi realizado com solução Nital 2% por 10 segundos. A aquisição das imagens foi realizada em um microscópio ótico Olympus BX51M, com ampliações de 50, 100 e 200 vezes.

Foi realizada uma análise de microdureza Vickers HV 0,1 para verificar a dureza final da peça e do revestimento. A análise foi realizada em um microdurômetro Shimadzu modelo HMV utilizando força de 0,9807N.

3 ANÁLISE DOS DADOS

A Fig. 3 mostra os corpos de prova antes e após a aplicação da aspersão térmica.

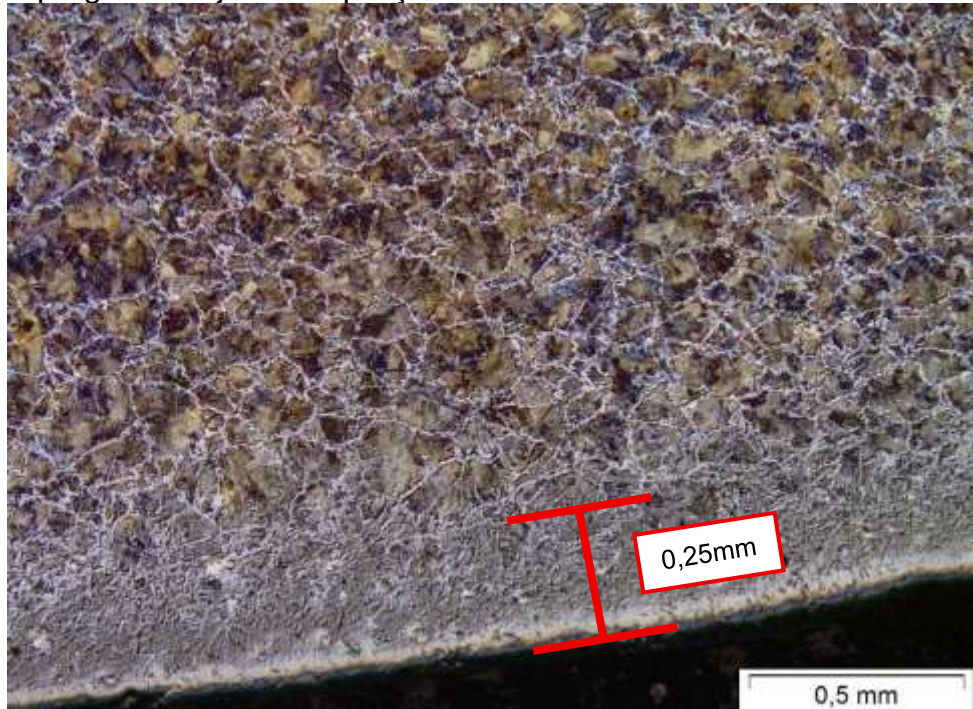
Figura 3 – Corpo de Prova antes e após aspersão térmica.



Fonte: do Autor, 2025.

Após o forjamento a microestrutura resultante está demonstrada na Fig. 4 com ampliação de 50x.

Figura 4 – Microscopia da seção transversal do corpo de prova aspergido e forjado. Ampliação de 50x.

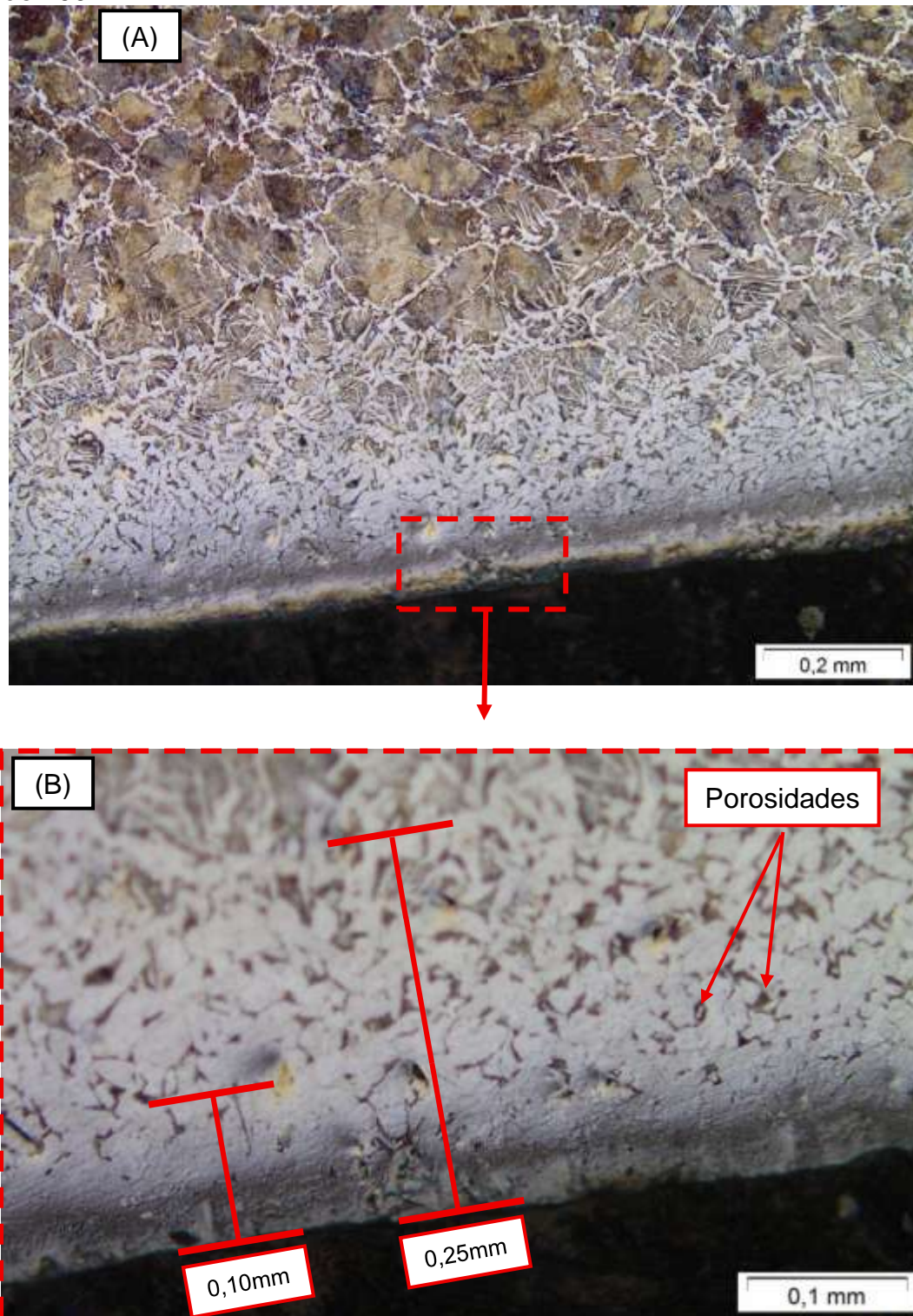


Fonte: do Autor, 2025.

A microestrutura do metal de base condiz com o esperado para um aço 1045, com presença de ferrita pró eutetóide e perlita [14]. Na superfície onde foi aspergido o aço inoxidável é possível observar que o reagente Nital não foi capaz de revelar a microestrutura, o que era esperado visto que esse reagente não é capaz de atacar aços inoxidáveis no geral. Houve de fato um caldeamento do material, pois não é possível verificar uma divisa exata entre material de base e revestimento. Observa-se ainda uma camada de aproximadamente 0,25mm de material não atacado.

A Fig. 5 mostra uma ampliação de 100x da região próxima a superfície revestida e uma ampliação de 200x apenas da camada de revestimento.

Figura 5 - Microscopia da seção transversal do corpo de prova na região próxima a superfície. (a) Ampliação de 100x e (b) ampliação de 200x.



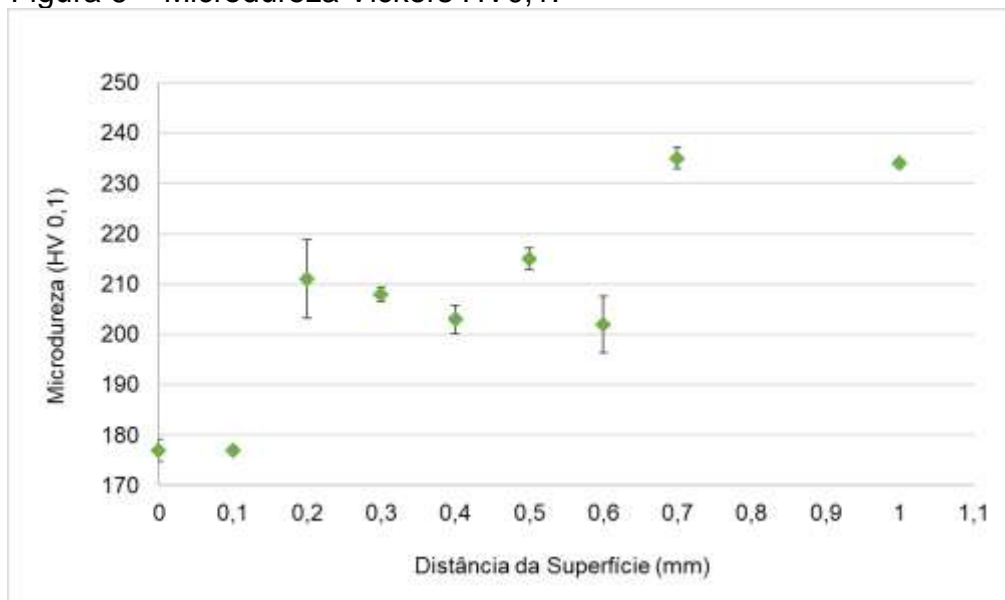
Fonte: do Autor, 2025.

Na ampliação de 100x é possível observar com mais detalhes a região de divisa entre revestimento e material de base. Nessa região o material possui uma característica intermediária, com pequenos pontos de ataque, indicando que houve

caldeamento e difusão entre os materiais. Não é possível observar ocorrência de trincas ou deslocamentos como já observado na menor ampliação. Na ampliação de 200x os detalhes do revestimento ficam mais claros. Há uma região de aproximadamente 0,10mm de profundidade onde o material de revestimento ficou mais homogêneo em relação a camada total apesar da presença de pequenas porosidades. Vê-se que na região de 0,25mm a partir de 0,10mm a presença de poros e descontinuidades é maior. Ainda, na região de divisa começam a surgir pontos onde os materiais se misturam e, portanto, ocorrem ataques do reagente revelando o início da microestrutura ferrítica/perlítica. A presença de poros e oxidações é algo comum no processo de aspersão térmica por arc spray, sendo esperado neste teste [13]. A superfície que possui o maior grau de compactação no forjamento alcançou um nível menor de porosidade, demonstrando que o forjamento foi capaz de reduzir as falhas provenientes do processo de aspersão nessa região, porém não foi suficiente para eliminar todas as descontinuidades.

A análise de microdureza mostrada na Fig. 6 condiz com os resultados obtidos na análise de metalografia. A camada de revestimento apresentou uma dureza menor em comparação ao aço de base, o que já era esperado para estes materiais.

Figura 6 – Microdureza Vickers HV0,1.



Fonte: do Autor, 2025.



4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aspersão térmica do aço inoxidável 316L em uma base de aço carbono seguida de forjamento a quente se mostrou bem-sucedida, pois permitiu o caldeamento do revestimento na base. Ainda, os resultados preliminares indicam que o forjamento reduziu o número de falhas no revestimento provenientes da aspersão térmica. A análise de metalografia não foi capaz de revelar a microestrutura do aço inoxidável, visto que o reagente utilizado não é capaz de atacar esse tipo de material. Todavia, foi possível estimar a camada resultante de revestimento, verificar a ausência de deslocamento e ainda revelar a microestrutura do aço de base.

Este trabalho se trata de um experimento inicial com o intuito de verificar a eficácia do forjamento a quente no caldeamento do revestimento por aspersão térmica. Nas próximas etapas serão realizadas aplicações de diferentes espessuras de camada de revestimento para verificar se este efeito se mantém. Além disso, será realizada uma caracterização mais precisa do revestimento utilizando diferentes reagentes e técnica de microscopia eletrônica de varredura.

REFERÊNCIAS

- [1] PAWLOWSKI, Lech. **The science and engineering of thermal spray coatings**. 2. ed. England: John Wiley & Sons, 2008. 626 p. ISBN 9780471490494.
- [2] VAZ, Rodolpho F. et al. Study of particle properties of different steels sprayed by arc spray process. **Coatings**, Basel, v. 10, n. 4, p. 1–13, 2020. DOI: 10.3390/coatings10040417.
- [3] IBRAM Mineração do Brasil. **Processo de corrosão faz com que 30% da produção mundial de ferro e aço seja desperdiçada**. Artigo on-line. 2020. Disponível em < [DOI: <https://doi.org/10.70185/2525-6025.2025.v10.497>](https://ibram.org.br/noticia/processo-de-corrosao-faz-com-que-30-da-producao-mundial-de-ferro-e-aco-seja-desperdicada/#:~:text=Segundo%20levantamento%2C%20cerca%20de%2030,bilh%C3%B5es)%20com%20manuten%C3%A7%C3%A3o%20da%20corros%C3%A3o.> https://ibram.org.br/noticia/processo-de-corrosao-faz-com-que-30-da-producao-mundial-de-ferro-e-aco-seja-desperdicada/#:~:text=Segundo%20levantamento%2C%20cerca%20de%2030,bilh%C3%B5es)%20com%20manuten%C3%A7%C3%A3o%20da%20corros%C3%A3o.> Acesso em: 23 de junho de 2025.[4] CALLISTER, William D. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.[5] HELMAN, Horacio; CETLIN, Paulo Roberto. Fundamentos da conformação: mecânica dos metais. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2013 260 p. ISBN 8588098288.</div><div data-bbox=)



- [6] AMIN, Sagar; PANCHAL, Hemant. A review on thermal spray coating processes. **International Journal of Current Trends in Engineering & Research (IJCTER)**, v. 2, n. 4, p. 556–563, Apr. 2016.
- [7] QADIR, Danial; SHARIF, Rabia; NASIR, Rizwan; AWAD, Ali; MANNAN, Hafiz Abdul. A review on coatings through thermal spraying. **Chemical Papers**, Bratislava, v. 78, p. 71–91, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11696-023-03089-4>.
- [8] KUMAR, S; KUMAR, R. Influence of processing conditions on the properties of thermal sprayed coating: a review. **Surface Engineering**. 2021;37(11):1339-1372. doi:10.1080/02670844.2021.1967024
- [9] ŁATKA, Leszek; PAWŁOWSKI, Lech; WINNICKI, Marcin; SOKOŁOWSKI, Pawel; MAŁACHOWSKA, Aleksandra; KOZERSKI, Stefan. 2020. Review of Functionally Graded Thermal Sprayed Coatings. **Applied Sciences** (10), n. 15: 5153. <https://doi.org/10.3390/app10155153>.
- [10] MALEK, Muhamad Hafiz Abd.; SAAD, Nor Hayati; ABAS, Sunhaji Kiyai; SHAH, Noriyati Mohd. Thermal arc spray overview. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 46, p. 012028, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/46/1/012028>.
- [11] LUCENA, Caroline Alexandre de. Avaliação da Adesão e Quantificação de Defeitos em Revestimentos Metálicos Depositados Por Processo Arco Elétrico (ARC-SPRAY). 2018. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia em Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca CEFET/RJ. Disponível em: <<https://dippg.cefet-rj.br/ppemm/attachments/article/256/2018DissertacaoCarolineLucena.pdf>>. Acesso em: 24 de junho de 2025
- [12] CARNEIRO, Mateus Rodrigues Diniz; FREITAS, Bruno Carvalho; DE BARROS, Iuri Barbosa; DE CAMPOS, José Brant; BASTOS, Ivan Ney; COSTA, Hector Rafael Meira. Evaluation of adhesion of epoxy resin sealant to improve the corrosion resistance of thermal sprayed coatings. **Applied Adhesion Science**, v. 8, n. 7, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s40563-020-00130-7>.
- [13] RAKHADILOV, Bauyrzhan; MAGAZOV, Nurtoleu; KAKIMZHANOV, Daur; APSEZHANOVA, Akbota; MOLBOSSYNOV, Yermakhan; KENGESBEKOV, Aidar. Influence of spraying process parameters on the characteristics of steel coatings produced by arc spraying method. **Coatings**, Basel, v. 14, n. 9, p. 1145, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/coatings14091145>.
- [14] COLPAERT, Hubertus. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4. ed., rev. atual. São Paulo: Edgard Blücher, 2008+ 1 CD-ROM xx, 652 p. ISBN 9788521204497.