

INFLUÊNCIA DA APLICAÇÃO DE SELANTES NAS PROPRIEDADES DOS REVESTIMENTOS DE AÇO INOXIDÁVEL SAE 420 PRODUZIDOS POR DIFERENTES PROCESSOS DE ASPERSÃO TÉRMICA

ALESSANDRO FRAGA FARAH¹

¹Fatec Sertãozinho – Tecnologia Mecânica
alessandro.farah@fatec.sp.gov.br

Influence of sealants application on the properties of SAE 420 stainless steel coatings produced by different thermal spray processes

Eixo Tecnológico: *Controle e Processos Industriais*

Resumo

A proposta deste trabalho, foi avaliar a resistência à corrosão dos revestimentos de aço inoxidável SAE 420, produzidos pelos processos de Aspersão Térmica (AT): HVOF (High Velocity Oxi Fuel), Chama Pó (Powder Flame Spray), Chama Arame (Wire Flame Spray) e Arco Arame (Wire Electric-Arc Spray), aplicando selantes após a deposição. Esses processos de aspersão térmica possuem características diferentes em relação à temperatura de aplicação, velocidade de aspersão, meio de queima do pó/arame, que podem produzir camadas de revestimentos com diferentes aspectos microestruturais. Um dos maiores problemas quando se aplica o aço inoxidável pelos processos de aspersão térmica é a porosidade, que pode levar à diminuição da resistência à corrosão, e uma maneira de atenuar esse problema, é aplicação de selantes após a deposição do revestimento. O objetivo principal deste trabalho foi comparar a resistência à corrosão entre os revestimentos de aço inoxidável SAE 420, aplicados por processos de AT diferentes, com e sem aplicações de selantes. Também foi avaliada a dureza dos revestimentos. Os ensaios realizados foram de análise microestrutural, dureza e ensaios de corrosão por Salt Spray e por Imersão. Os resultados entre os revestimentos com e sem aplicação de selantes foram comparados e mostraram que a aplicação do selante diminuiu bastante a corrosão, mostrando-se altamente eficiente quando aplicado na superfície do revestimento. Entretanto, não houve variação significativa ao longo da espessura da camada de revestimento. Espera-se que os resultados obtidos auxiliem em futuros estudos e também nas aplicações industriais.

Palavras-chave: *Aspersão térmica, Revestimento, Aço inoxidável, Corrosão, Selantes.*

Abstract

The purpose of this work was to evaluate the corrosion resistance of SAE 420 stainless steel coatings produced by the following Thermal Spray (HT) processes: HVOF (High Velocity Oxi Fuel), Powder Flame Spray, Wire Flame Spray and Wire Electric-Arc Spray, applying sealants after deposition. These thermal spray processes have different characteristics regarding application temperature, spray speed, and powder/wire burning medium, which can produce coating layers with different microstructural aspects. One of the biggest problems when applying stainless steel by thermal spray processes is porosity, which can lead to decreased corrosion resistance. One way to mitigate this problem is to apply sealants after coating deposition. The main objective of this work was to compare the corrosion resistance between SAE 420 stainless steel coatings applied by different HT processes, with and without sealant applications. The hardness of the coatings was also evaluated. The tests performed were microstructural analysis, hardness, and corrosion tests by Salt Spray and Immersion. The results between the coatings with and without sealant application were compared and showed that the application of the sealant significantly reduced corrosion, proving to be highly efficient when applied to the surface of the coating. However, there was no significant variation throughout the thickness of the coating layer. It is expected that the results obtained will assist in future studies and also in industrial applications.

Key-words: *Thermal spray, Coating, Stainless steel, Corrosion, Sealants.*

1. Introdução

A aspersão térmica (AT) foi desenvolvida ainda no século 20 e é um termo genérico para um grupo de processos em que metais e cerâmicas na forma de pó ou arame são alimentados a uma tocha ou pistola com os quais são aquecidos a quase ou um pouco acima de seu ponto de fusão. O material fundido ou gotículas quase fundidas, são aceleradas em uma corrente de gás

Anais da VIII Mostra de Docentes em RJI

e projetadas contra a superfície a ser revestida (substrato). No impacto, as gotículas fluem para partículas lamelares finas que aderem à superfície, sobrepondo-se e interligando-se à medida que se solidificam [1, 2]. Os revestimentos de aspersão são utilizados em várias áreas diferentes, desde a indústria de base, passando pela automobilística, aeronáutica, aeroespacial, energia e até na biomédica. Existem muitos processos de aspersão térmica disponíveis para a deposição de revestimentos como objetivo de melhorar diversas propriedades superficiais. A combinação de um substrato e um revestimento adequado é uma estratégia de fabricação altamente flexível e econômica, principalmente para uso em ambientes altamente agressivos [3, 4, 5].

Os processos mais utilizados em revestimentos por aspersão térmica são: Aspersão por chama, HVOF (Aspersão Oxi-Combustível de Alta Velocidade) e Aspersão por Arco Elétrico.

O processo por Chama utiliza uma combinação de oxigênio com vários combustíveis gases, incluindo hidrogênio, propano, propileno, hidrogênio e até querosene. Em geral, os revestimentos aspergidos por chama apresentam menor adesão, menor resistências e maior porosidade, do que a maioria dos outros processos de aspersão térmica [5].

Os revestimentos HVOF apresentam bom desempenho e são amplamente utilizados em aplicações antidesgaste, anticorrosão e antioxição em altas temperaturas. No entanto, a alta temperatura da chama e o oxigênio derivado da entrada de ar ambiente no jato de chama, juntamente com a combustão incompleta e as condições de pulverização com excesso de oxigênio, fazem com que a partícula seja oxidada [6]. Além de resultar em uma microestrutura ou mudança de fase do revestimento depositado. Neste processo, os revestimentos têm porosidade extremamente baixa e alta força de adesão em comparação com os outros [3].

O processo por Arco Elétrico usa dois eletrodos de arame consumíveis conectados a uma fonte de corrente contínua de alta corrente, que são alimentados na pistola, e quando se tocam estabelecem um arco entre eles que derrete as pontas dos fios, e ar comprimido para impulsionar as partículas fundidas contra o substrato [2, 5, 7]. Os revestimentos desse processo fornecem forte resistência de ligação, baixas temperaturas do substrato e altas taxas de cobertura, tornando-os muito adequados para grandes áreas [8, 9].

O material de revestimento pode ser selecionado especificamente para cada substrato individual e o desempenho esperado em serviço e, portanto, uma combinação quase perfeita pode ser feita entre os dois [9].

A microestrutura dos revestimentos, que resulta da solidificação e sinterização das partículas, frequentemente contém poros, óxidos e fissuras. A quantidade e distribuição desses defeitos, bem como outras propriedades do revestimento, como espessura, dureza e resistência de união, serão definidas pelos parâmetros de pulverização selecionados [7, 8, 10, 11].

Ao usar diferentes processos de revestimento, materiais de revestimento e parâmetros do processo, as propriedades de revestimento resultantes podem diferir [11, 12]. Na prática, não é possível obter revestimentos de pulverização térmica sem defeitos, que induzem ao desgaste prematuro e diminuem a resistência à corrosão.

Nas aplicações industriais, a qualidade do revestimento é geralmente avaliada medindo sua porosidade, teor de óxido, macro e microdureza, força de adesão e acabamento superficial [13].

A qualidade dos revestimentos é avaliada pela estabilidade de fase, densidade do revestimento, força adesiva, dureza, tenacidade, teor de óxido e rugosidade da superfície [5].

Os revestimentos de AT geralmente apresentam poros e microfissuras em sua estrutura, O meio corrosivo passa através de poros e microfissuras e danifica o substrato, levando à falha do revestimento e à redução da vida útil [14].

A porosidade intrínseca dos revestimentos por aspersão térmica em ambientes corrosivos, podem facilitar a entrada de agentes corrosivos, resultando no início da corrosão levando à delaminação do revestimento [15]. Os autores também alertam que a estrutura porosa não só

Anais da VIII Mostra de Docentes em RJ

deteriora a sua resistência à corrosão, mas também diminui as suas propriedades mecânicas e consequentemente reduz a sua resistência ao desgaste. Os poros e fissuras afetam negativamente a maioria das propriedades dos revestimentos aspergidos, a vedação destes revestimentos é estudada [15].

A selagem é um tratamento pós-pulverização que consiste no preenchimento ou fechamento de poros e fissuras próximas à superfície [16]. Uma grande variedade de métodos tem sido apresentada. Entre os métodos utilizados, a infiltração do revestimento por metais fundidos, resinas plásticas ou fosfato de alumínio, podem ser adicionados sobre a camada pulverizada de forma de selar os seus poros [15, 16, 17].

O desempenho das superfícies seladas é geralmente superior às não seladas, porém, é necessário uma avaliação da resistência à corrosão em determinado ambiente após este tratamento [17].

Baseando-se nas referências bibliográficas e de empresas fornecedoras desses produtos e processos, uma investigação mais detalhada foi necessária para compreender como a vedação dos poros afeta a resistência à corrosão dos revestimentos. Sendo assim, foi estudado o revestimento de aço inoxidável AISI 420 quando aplicado selantes comparando com o mesmo revestimento sem aplicação de selantes. Para tanto foram avaliadas a microestrutura final, a dureza e a resistência à corrosão. Os resultados obtidos servirão para aumentar o conhecimento da comunidade científica e industrial à cerca deste assunto, que de uma maneira geral estão sempre à procura de novos materiais e processos que aumentem a vida útil e tenham uma melhor relação custo/benefício.

2. Materiais e métodos

2.1. Materiais

Para a execução do projeto, foram utilizadas amostras de aço SAE 1020, sobre as quais foram depositados os revestimentos de acordo com cada processo e/ou variação dos parâmetros. Foram confeccionadas 05 amostras para cada condição estabelecida. Os materiais utilizados no estudo estão relacionados como Metal Base ou Substrato (material que recebe o revestimento, nesse estudo o aço SAE 1020), Revestimento (material depositado sobre o substrato) e Almofada (material aspergido sobre o substrato, antes do revestimento).

As composições químicas dos revestimentos utilizados no trabalho estão na Tabela 1.

Tab. 1 – Composição química nominal dos materiais estudados (%).

Material	C	Si	Mn	Cr	Al	Mo	S	P	Ni	Fe
GPS 420-21/4	0,2	0,70	0,92	12,83	-	-	0,007	-	0,56	Bal.
CMS 420	0,3	0,55	0,37	12,59	-	-	0,03	0,03	-	Bal.
GSNi20Al	-	-	-	-	20,30	-	-	-	Bal.	-
GSNi5Al	-	-	-	-	5,5	-	-	-	Bal.	-
Solocoat	-	-	-	-	6,06	5,26	-	-	Bal.	-
SAE 1020	0,2	0,25	0,40	-	-	-	0,05	0,03	-	Bal.

Fonte: Comersul – Aspersão Térmica e Soldas Especiais (2023)

Para o revestimento utilizado no processo de Aspersão térmica por Chama Pó foi utilizado o material GPS 420-21 e para o HVOF foi utilizado o material GPS 420-4. A diferença entre os pós está na granulometria.

O selante utilizado foi o Dichtol HTR HS #2530, fabricado pela DIAMANT Polymer GmbH e fornecido pela empresa Comersul. Esse selante, segundo o fabricante, é uma mistura de polímeros altamente capilares ativos de baixa viscosidade, desenvolvido para penetrar profundamente em estruturas porosas por força capilar. É resistente até uma temperatura

máxima de 500°C e sua alta porcentagem de sólidos promete proteção permanente e confiável contra corrosão. É recomendável para selagem de revestimentos aplicados por aspersão térmica.

2.2. Metodologia

O material CMS 420, com diâmetro de 3,2mm, foi utilizado no processo Chama Arame. O almofadamento foi feito com o material Solocoat para o processo Chama Pó e com o GSNi20Al para o Chama Arame. No processo Arco Arame, o revestimento utilizado foi o CMS 420, com diâmetro de 1,6mm. Nesse processo, a almofada aplicada foi o GSNi5Al.

No processo Chama Pó (Powder Flame Spray), as amostras foram nomeadas PFS-420-21. Para o processo HVOF denominou-se HVOF-420-4. Nos processos Chama Arame (Wire Flame Spray), os mesmos materiais foram utilizados, entretanto alguns parâmetros foram modificados para verificação da influência deles nas propriedades finais dos revestimentos. As amostras denominadas de WFS-420-St foram aspergidas utilizando os parâmetros padrões recomendados nos equipamentos e nas amostras WFS-420-Rd, os parâmetros foram modificados. Para o processo Arco Arame (Wire Electric- Arc Spray), as amostras foram nomeadas de WAS-420-StT, para o procedimento padrão feito por uma empresa, e WAS-420-St para o procedimento padrão e WAS-420-Rd para o procedimento com os parâmetros modificados por outra empresa.

Após a aplicação dos revestimentos, dois corpos de prova de cada processo foi selecionado para a aplicação do selante Dichtol HTR HS #2530.

As amostras aplicadas selante, tiveram a sua nomenclatura adicionadas de -S (PFS-420-21 ficou PFS-420-21-S, HVOF-420-4 ficou HVOF-420-4-S e assim sucessivamente).

Os ensaios de dureza foram feitos em durômetro tipo Rockwell, na superfície dos corpos de prova aspergidos termicamente, utilizando a escala C (dureza HRC). Em cada amostra foram feitas 05 medições. O mesmo procedimento foi feito para as amostras com selante.

Depois dos ensaios de dureza, as amostras foram submetidas aos ensaios de corrosão por Salt Spray e por Imersão. Após os ensaios, os corpos de prova foram cortados transversalmente, para as análises metalográficas.

3. Resultados e Discussão

Ensaio de Dureza

Os resultados dos ensaios de dureza superficial são mostrados na Tabela 2. A tabela mostra a média de 05 medições para cada amostra.

Tab. 2 – Dureza superficial dos revestimentos.

Material	Dureza Encontrada (HRC)
PFS-420-21 / PFS-420-21-S	21,8 ±1,8
HVOF-420-4 / HVOF-420-4-S	44,1±1,9
WFS-420-St / WFS-420-St-S	28,6±1,1
WFS-420-Rd / WFS-420-Rd-S	35,1±0,8
WAS-420-StT / WAS-420-StT-S	28,7±0,6
WAS-420-St / WAS-420-St-S	36,5±1,4
WAS-420-Rd / WAS-420-Rd-S	34,2±0,6

Fonte: Autor (2024)

Os resultados dos ensaios de dureza superficial das amostras com aplicação do selante foram idênticas às amostras sem selante, ficando dentro do desvio padrão.

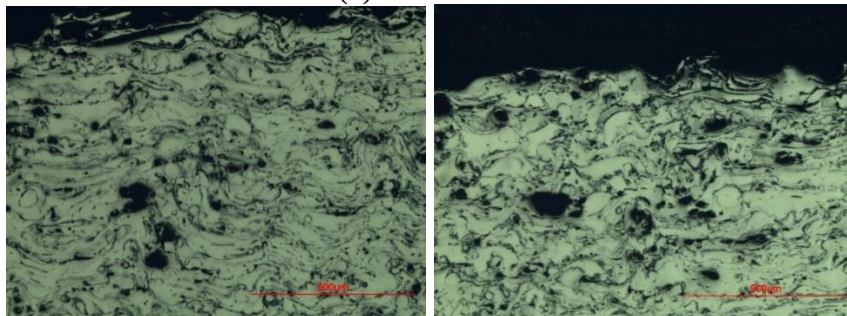
Ensaio Metalográfico das Amostras por Salt Spray

Anais da VIII Mostra de Docentes em RJ

As análises de metalografia das amostras submetidas ao ensaio de corrosão por Salt Spray, com aplicação do selante foram idênticas às amostras sem selante, sem variações significativas que comprometessem os resultados e só algumas amostras serão mostradas.

A Figura 1 mostra a estrutura da amostra WAS-420-St sem selante (a) e WAS-420-St-S com selante (b). Não foram encontradas diferenças entre as amostras sem e com selante.

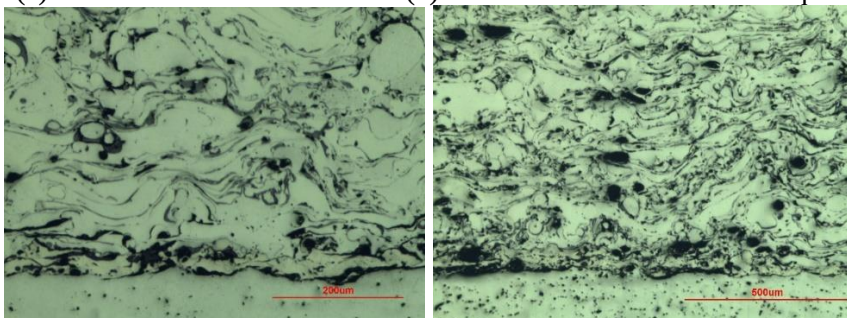
Fig. 1 – (a) Amostra WAS-420-St. (b) WAS-420-St-S. Aumento: 50x. Sem ataque químico.



Fonte: Autor (2024)

A Figura 2 mostra a estrutura da amostra WAS-420-St sem e com selante. Não foi encontrado diferença entre as amostras com selante comparada com a amostra sem selante.

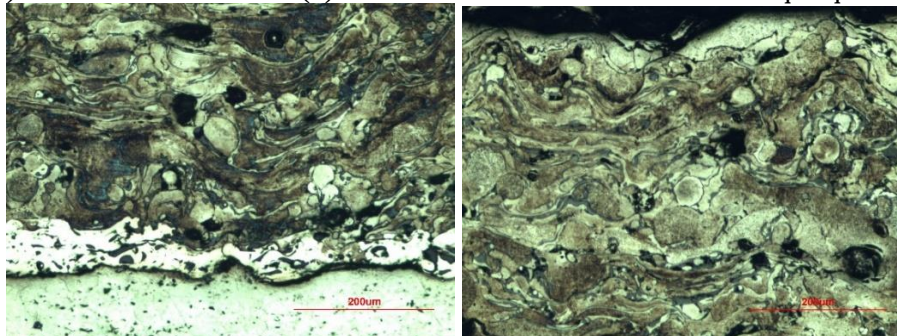
Fig. 2 – (a) Amostra WAS-420-St. 100x. (b) WAS-420-St-S. 50x. Sem ataque químico.



Fonte: Autor (2024)

A Figura 3 mostra a estrutura da amostra WAS-420-St com selante e com ataque químico. Não foi encontrado vestígio do selante na amostra atacada quimicamente.

Fig. 3 – (a) Amostra WAS-420-St. (b) WAS-420-St-S. Aumento: 100x. Ataque químico: Marble.



Fonte: Autor (2024)

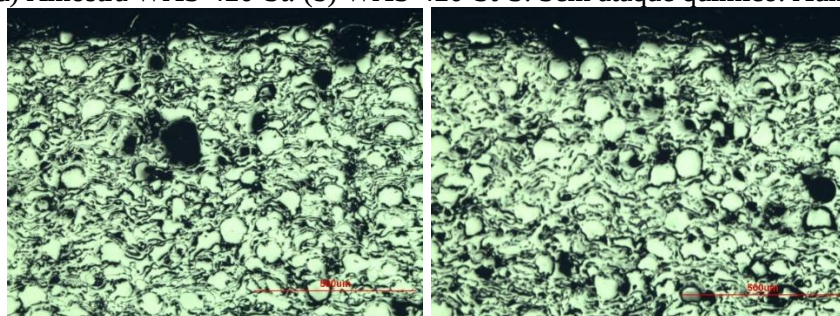
Ensaio Metalográfico das Amostras da Imersão

Os resultados dos ensaios de metalografia das amostras submetidas ao ensaio de corrosão por Imersão, com aplicação do selante foram idênticas às amostras sem selante, sem variações

significativas na análise e portanto somente algumas amostras serão mostradas.

A Figura 4 mostra a estrutura da amostra WAS-420-St sem e com selante. Não foi encontrado diferença entre a amostra com selante comparada com a amostra sem selante, na superfície da amostra.

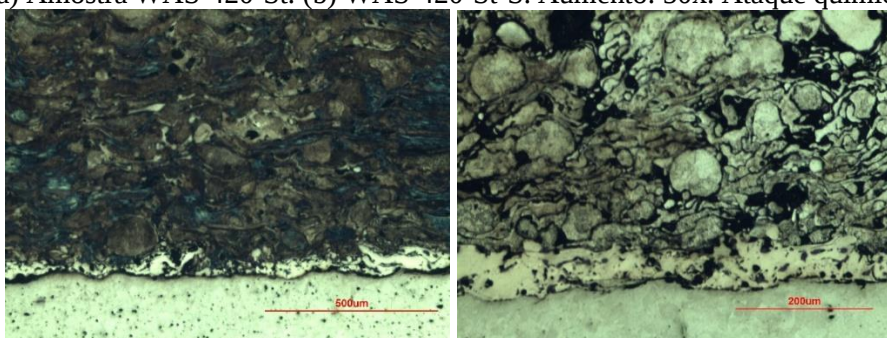
Fig. 4 – (a) Amostra WAS-420-St. (b) WAS-420-St-S. Sem ataque químico. Aumento: 50x.



Fonte: Autor (2024)

A Figura 5 mostra a estrutura da amostra WAS-420-St sem e com selante. Não foi encontrado diferença entre a amostra com selante comparada com a amostra sem selante, na base da amostra.

Fig. 5 – (a) Amostra WAS-420-St. (b) WAS-420-St-S. Aumento: 50x. Ataque químico: Marble.



Fonte: Autor (2024)

Análises dos Ensaios de Corrosão por Imersão e Salt Spray

As amostras submetidas aos ensaios de corrosão foram pesadas antes e depois de cada ensaio. A perda ou ganho de massa, é a diferença entre as amostras antes e depois dos ensaios.

A tabela a seguir mostra os resultados obtidos após os ensaios.

Tab. 3 – Perda ou Ganho de Massa das amostras.

Material	Corrosão Imersão (mg)	Corrosão Imersão Lixado (mg)	Corrosão Salt Spray (mg)
PFS-420-21	54,7		-291,9
PFS-420-21-S	3,7	48,1	-254,4
HVOF-420-4	101		-66,8
HVOF-420-4-S	6,7	157,4	-70,1
WFS-420-St	55,9		-115,5
WFS-420-St-S	4,5	53,7	-118,9
WFS-420-Rd	109,1		-133,7
WFS-420-Rd-S	4,2	103,2	-134,6

Anais da VIII Mostra de Docentes em RJ

WAS-420-StT	54,1		-98,9
WAS-420-StT-S	1,1	47,1	-82,0
WAS-420-St	49,9		-85,9
WAS-420-St-S	1,1	49,1	-87,2
WAS-420-Rd	36,8		-110,4
WAS-420-Rd-S	2,9	33,1	-105,4

Fonte: Autor (2024)

4. Considerações finais

Baseando-se nos resultados obtidos, podemos considerar que:

- Todos os processos sofreram desgaste corrosivo independentemente do método de ensaio, Salt Spray ou Imersão.
- O processo WFS-420-Rd teve a maior perda de massa no ensaio por Imersão, enquanto o processo WAS-420-Rd teve a menor perda. Isso para as amostras sem selante. Com a aplicação do selante, a perda de massa foi mínima para todos os processos.
- No ensaio por Salt Spray, o maior ganho de massa foi do processo PFS-420-21 tanto nas amostras com selante quanto sem selante. O menor ganho de massa foi do processo HVOF-420-4. A aplicação do selante nas amostras, não refletiu numa diferença significativa em relação as amostras sem selante.
- As amostras com aplicação do selante, que foram submetidas ao ensaio de imersão, foram lixadas na superfície para verificar se o selante atuaria em toda a extensão dos revestimentos. Os resultados foram bem próximos das amostras sem selante, mostrando que o selante propicia apenas uma proteção superficial e que uma vez em uso, sofrer algum tipo de desgaste abrasivo, a proteção não é efetiva.

Referências

- [1] ASM Handbook. **Thermal Spray Coatings**. ASM Handbook Volume 5: Surface Engineering. Robert C. Tucker, Jr., Praxair Surface Technologies, Inc. C.M. Cotell, J.A. Sprague, and F.A. Smidt, Jr., editors, p 497-509. 1994 ASM International.
- [2] ASM Handbook. **Introduction to Coating Design and Processing**. ASM Handbook, Volume 5A, Thermal Spray Technology. R.C. Tucker, Jr., editor. Copyright # 2013 ASM International.
- [3] LIMA, C. R. C., LIBARDI, R., CAMARGO, F., MOJENA, M. A. R., CARVAJAL, H. D., FERRARESI, V. A. **Study of the Wear and Corrosion Performance of Hard Coatings Applied by Different Processes on Low Carbon Steel**. Materials Sciences and Applications, 2016, 7, 358-370. Published Online July 2016 in SciRes. <http://www.scirp.org/journal/msa>. <http://dx.doi.org/10.4236/msa.2016.77032>
- [4] ARUN, A.; SATYANARAYANA, K.; SUBBIAH, R. **Comparative study of wear behaviour on al-2014 alloy coated with thermal spray HVOF (high velocity oxygen fuel) and plasma spray methods – a review**. Global Journal Of Engineering Science And Researches. 154-160. [ICAME-2018] ISSN 2348 – 8034 Impact Factor- 5.070
- [5] AMIN, S.; PANCHAL, H. **A Review on Thermal Spray Coating Processes**. International Journal of Current Trends in Engineering & Research (IJCTER). e-ISSN 2455–1392 Volume 2 Issue 4, April 2016 pp. 556 – 563. Scientific Journal Impact Factor : 3.468. <http://www.ijcter.com>
- [6] SUN, B.; FUKANUMA, H.; OHNO, N. **Study on stainless steel 316L coatings sprayed by a novel high pressure HVOF**. January 2014. Surface and Coatings Technology. 239:58–64. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2013.11.018
- [7] CWST (<https://www.cwst.co.uk/which-type-thermal-spray-coating-is-best-for-your-component/>).

Acesso em: 20/09/2022.

- [8] CHEMAA, K.; KEZRANE, M.; HASSANI, S.; ABDI.; HAIRECHE, S. **Tribological and Corrosion Behaviors of 304L and 317L Stainless Steel Coatings for Mechanical Parts Subjected to Friction and Wear.** Published 31 March 2022. Materials Science. Journal of Materials Engineering and Performance. DOI:10.1007/s11665-022-06830-4. Corpus ID: 247844759
- [9] SCHIEFLER FILHO, M. F. O.; BUSCHINELLI, A. J. A.; GÄRTNER, F.; KIRSTEN, A.; VOYER, J.; KREYE, H. **Influence of process parameters on the quality of thermally sprayed X46Cr13 stainless steel coatings.** Technical Papers. J. Braz. Soc. Mech. Sci. & Eng. 26 (1). Mar 2004. <https://doi.org/10.1590/S1678-58782004000100016>
- [10] IRS LTD (<https://www.irs ltd.co.uk/advantages-and-disadvantages-of-thermal-spray-coatings/>). Acesso em: 29/09/2022.
- [11] KUMAR, P. A.; KHURANA, V. **A review- study of thermal spray coatings for corrosive wear.** International Journal of Advance Research , Ideas and Innovations in Technology. ISSN: 2454-132X (Volume2, Issue3). 2016.
- [12] MINDIVAN, H., KALE, A., BERSE, Ü., SAMUR, R., “**A Comparative Study of Thermal Sprayed AISI 316L Stainless Steel Coatings**” El-Cezerî Journal of Science and Engineering, 2017, 4(1); 127-134.
- [13] VAZ, R. F.; PUKASIEWICZ, A. G. M.; FALS, H. D. C.; LOURENÇATO, L. A.; PAREDES, R. S. C. **Study of Particle Properties of Different Steels Sprayed by Arc Spray Process.** Coatings 2020, 10, 417; doi:10.3390/coatings10040417 www.mdpi.com/journal/coatings
- [14] DENG, C.; LU, Z.; LU, H.; LIU, C.; WU, S.; QIN, E. **Effect of vacuum sealing on corrosion resistance of highvelocity arc sprayed coating.** MAEIE-2022Journal of Physics: Conference Series 2419 (2023) 012024 IOP Publishing doi:10.1088/1742-6596/2419/1/012024
- [15] NGUYEN, V. T.; THU, Q. L.; NGUYEN, T. A.; LY, Q. C.; THI, L. P.; THI, H. P.; MAI, D. D. T. **Arc Thermal Spray NiCr20 Alloy Coating: Fabrication, Sealant, Heat Treatment, Wear, and Corrosion Resistances.** International Journal of Electrochemistry. Volume 2019, Article ID 8796958, 8 pages. <https://doi.org/10.1155/2019/8796958>
- [16] AMOUSOLTANI, N.; SALIMIJAZI, H.; GOLOZAR, M., **Study of alumina sealing of HVOF thermally sprayed WC-Co coatings by sol-gel method.** Mater. Res. Express 7 (2020) 016410 <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab5fea>
- [17] CARNEIRO, M. R. D.; FREITAS, B. C.; BARROS, I. B.; CAMPOS, J. B.; BASTOS, I. N.; COSTA, H. R. M., **Evaluation of adhesion of epoxy resin sealant to improve the corrosion resistance of thermal sprayed coatings.** September 24th, 2020. <https://doi.org/10.1186/s40563-020-00130-7>.