

CARACTERIZAÇÃO DE REVESTIMENTOS DE AÇO INOXIDÁVEL SAE 420 PRODUZIDOS PELO PROCESSO DE ASPERSÃO TÉRMICA POR HVOF, CHAMA ARAME E CHAMA PÓ

FARAH, A. F.

*Fatec Sertãozinho – Tecnologia Mecânica: Processos de Soldagem
alessandro.farah@fatec.sp.gov.br*

Characterization of SAE 420 Stainless Steel Coatings Produced by Thermal Spray Process by HVOF, Wire Flame Spray and Powder Flame Spray

Eixo Tecnológico: Controle e Processos Industriais.

Resumo

Os processos de aspersão térmica são diversos e possuem características diferentes em relação à temperatura de aplicação, velocidade de aspersão, combustível de queima do pó/arame, que podem produzir camadas de revestimentos com diferentes percentuais de óxidos, partículas não fundidas, porosidade, além de apresentarem microestrutura e propriedades mecânicas também distintas. Este trabalho, tem como proposta avaliar as propriedades dos revestimentos de aço inoxidável SAE 420, produzidos pelos processos de aspersão térmica: HVOF (High Velocity Oxi Fuel), Chama Arame (Wire Flame Spray) e Chama Pó (Powder Flame Spray). O objetivo principal deste trabalho foi comparar os diferentes processos de aspersão térmica utilizando o mesmo material a ser aplicado, neste caso o aço inoxidável SAE 420. Esse material é fornecido na forma de pó, onde a granulometria varia para cada processo (HVOF e Chama), ou arame, no caso da aplicação por Chama Arame. As características metalúrgicas e mecânicas finais foram estudadas. Para o estudo dessas características, foram realizados ensaios de dureza, ensaios de desgaste do tipo Roda de Borracha e ensaios metalográficos. Os resultados dos ensaios de dureza, e de desgaste foram comparados e relacionados com a microestrutura obtida. Espera-se que os resultados obtidos auxiliem em futuros estudos e nas aplicações de cada processo.

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

Abstract

Thermal spraying processes are diverse and have different characteristics in relation to application temperature, spraying speed, fuel of burning powder/wire, which can produce coating layers with different percentages of oxides, unmolten particles, porosity, in addition to have different microstructure and mechanical properties. This work aims to evaluate the properties of SAE 420 stainless steel coatings, produced by thermal spray processes: HVOF (High Velocity Oxi Fuel), Wire Flame Spray and Powder Flame Spray. The main objective of this work was to compare the different thermal spraying processes using the same material to be applied, in this case SAE 420 stainless steel. This material is supplied in powder form, where the particle size varies for each process (HVOF and Powder Flame Spray), or wire, in the case of application by Wire Flame Spray. The final metallurgical and mechanical characteristics were studied. To study these characteristics, hardness tests, Rubber Wheel wear test and metallographic tests were carried out. The results of hardness and wear tests were compared and related to the microstructure obtained. It is expected that the results obtained will assist in future studies and applications of each process.

Keywords: *Thermal spray, Coating, Stainless steel, Wear.*

1. Introdução

Aspersão térmica é um termo genérico para um grupo de processos em que metais, cerâmicas e alguns materiais poliméricos 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 e projetadas contra

Anais da VII Mostra de Docentes em RJJ

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]. Para criar as partículas fundidas, são necessários uma fonte de calor, um material de pulverização e um método de atomização/projeção. Ao entrar em contato, as partículas se achatam na superfície, solidificam e se unem mecanicamente, primeiro no substrato rugoso e depois umas nas outras à medida que a espessura do revestimento aumenta [3, 4].

Os revestimentos de aspersão térmica são usados em um amplo espectro de muitas aplicações úteis, que podem incluir desde a proteção contra altas temperaturas, produtos químicos ou condições ambientais, como umidade e chuva [5, 6], e são utilizados em várias áreas diferentes, desde a indústria de base, passando pela automobilística, aeronáutica, aeroespacial, energia e até na biomédica [7].

Os processos de aspersão térmica são muito adequados para obter revestimentos de alto desempenho para proteção ou reparo de componentes [3]. Existem muitos processos de aspersão térmica atualmente disponíveis para a deposição de revestimentos com o objetivo de melhorar diversas propriedades superficiais da peça metálica. A combinação de um substrato estruturalmente adequado material e um revestimento adequado provou ser uma estratégia de fabricação altamente flexível e econômica, principalmente para uso em ambientes altamente agressivos [3, 7]. Os processos mais comuns para gerar revestimentos por aspersão térmica são: Aspersão por chama, HVOF (Aspersão por Oxi-Combustível de Alta Velocidade), Aspersão por Plasma e Aspersão por Arco Elétrico [8].

O processo por Chama (Flame Spray) é considerado o método original de aspersão térmica e é usado em diversas áreas da indústria. Esse processo utiliza uma chama de oxi-acetileno para aplicar o revestimento. O calor da chama derrete o material de revestimento escolhido e o ar comprimido o impulsiona para o produto que está sendo revestido. O processo por chama também é chamado de “processo a frio” devido à temperatura de trabalho relativamente baixa durante o processo. [1, 2, 8, 9]. Esse processo é caracterizado pelo baixo capital investido, altas taxas de deposição, relativa facilidade de operação e baixo custo de manutenção de equipamento. O processo de chama usa gás combustível como fonte de calor para derreter o revestimento material e o jato de gás de transporte projeta-o contra o substrato [7, 9, 10].

O HVOF (High Velocity Oxy Fuel), é um processo que impulsiona pós semi-fundidos em velocidade supersônica sobre o substrato. O pó semi-fundido então esfria e solidifica em uma fração de segundos para formar uma ligação mecânica com a superfície do componente. Os revestimentos HVOF tendem a ser extremamente densos com baixa porosidade, bom controle de espessura e forte resistência de união [1, 2, 8]. O processo utiliza uma combinação de oxigênio com vários combustíveis gases, incluindo hidrogênio, propano, propileno, hidrogênio e até querosene. Os revestimentos HVOF apresentam bom desempenho e são amplamente utilizados em aplicações antidesgaste, anticorrosão e antioxidação em altas temperaturas [7]. 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 facilmente oxidada. A oxidação das partículas geralmente resulta em uma piora do desempenho do revestimento. Além disso, o aquecimento do pó a um estado de fusão ou semifusão também pode resultar em uma microestrutura ou mudança de fase do revestimento depositado [11]. Neste processo, os revestimentos têm porosidade extremamente baixa e alta força de adesão em comparação com a pulverização convencional processos [3].

Existem diversos materiais diferentes que podem ser transformados em revestimentos de alta qualidade através do processo de aspersão térmica [12]. Os materiais de revestimento

Anais da VII Mostra de Docentes em RJI

disponíveis para aspersão térmica incluem metais, ligas, cerâmicas, plásticos e compósitos. Eles são alimentados na forma de pó, fio ou haste, aquecidos a um estado fundido ou semi-fundido e acelerados em direção a substratos na forma de partículas de tamanho micrométrico [13]. 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 [10]. A microestrutura dos revestimentos pulverizados termicamente, 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 selecionados [8, 12, 14, 15]. Na prática, não é possível obter revestimentos de aspersão 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 [15, 16].

Portanto, baseando-se nos estudos citados e nas referências de empresas fornecedoras desses produtos e processos, propõe-se um estudo comparativo entre os processos de aspersão térmica HVOF, Chama Pó e Chama Arame, fixando o material do revestimento com o aço inoxidável AISI 420 e avaliando o metal depositado em relação à microestrutura final, a dureza e a resistência ao desgaste.

2. Materiais e métodos

2.1. Materiais

Os materiais utilizados no estudo estão relacionados como metal base (material que recebe o revestimento), revestimento (material depositado sobre o metal base) e almofada (material aspergido sobre o metal base antes do revestimento).

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. Para o revestimento utilizado no processo Chama Arame foi utilizado o material CMS 420. O almofadamento foi feito com o material Solocoat para o processo Chama Pó e com o GSNi20Al para o Chama Arame. O metal base utilizado para deposição de todos os revestimentos, foi o aço SAE 1020.

As composições químicas dos materiais 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	0,23	0,70	0,92	12,83	-	-	0,0069	-	0,56	Bal.
CMS 420	0,37	0,55	0,37	12,59	-	-	0,03	0,03	-	Bal.
GSNi20Al	-	-	-	-	20,30	-	-	-	Bal.	-
Solocoat	-	-	-	-	6,06	5,26	-	-	Bal.	-
SAE 1020	0,20	0,25	0,40	-	-	-	0,05	0,03	-	Bal.

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

2.2. Metodologia

As amostras foram usinadas nas dimensões de 25x75x12,5mm e jateadas conforme o processo. Para cada processo e/ou variação dos parâmetros, foram confeccionadas 03 amostras.

Os parâmetros, condições, equipamentos e materiais utilizados estão na Tabela 2.

Anais da VII Mostra de Docentes em RJI

Tab. 2 – Materiais, Processos e Parâmetros utilizados no estudo.

Material	GPS 420 – 21	GPS 420 – 4	Arame CMS 420	Arame CMS 420
Amostra	PFS-420-21	HVOF-420-4	WFS-420-St	WFS-420-Rd
Processo	Chama Pó	HVOF	Chama Arame	Chama Arame
Equipamento	MK74	JP5000	MK61 (Padrão)	MK61 (Reg. Dif.)
Empresa	Comersul	OPT	LGR	LGR
Pré aquecimento (°C)	40	Não	Não	Não
Almofadamento	Solocoat (NiAlMo)	Não	GSNi20Al	GSNi20Al
Pressão Ar Comprimido (Psi)	20	-	60	80
Pressão Oxigênio (Psi) / Regulagem Flowmeter	30 / 6,5	130	22 / 5,5	22 / 6
Pressão Acetileno (Psi) / Regulagem Flowmeter	12 / 5	-	15 / 2,5	15 / 3
Pressão Querosene (Psi)	-	113	-	-
Distância Bico/Peça (mm)	180	355	160	180
Granulometria (µm)	-106+45	-45+15	-	-
Diâmetro (mm)	-	-	3,2	3,2
Jateamento	Granalha de aço	Óxido de alumínio	Granalha de aço	Granalha de aço

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

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 para as amostras WFS-420-Rd, os parâmetros foram modificados.

Os ensaios de dureza foram feitos em durômetro tipo Rockwell, na superfície dos corpos de prova aspergidos termicamente. Em cada amostra foram feitas um mínimo de 05 medições. Após as medições das durezas superficiais, os corpos de prova foram submetidos aos ensaios de desgaste num abrasômetro tipo roda de borracha, de acordo com a norma ASTM G65, procedimento A. Para cada amostra foram ensaiados 03 corpos de prova.

Depois dos ensaios de abrasão, os corpos de prova foram cortados transversalmente, para as análises metalográficas.

3. Resultados e Discussão

Os resultados do ensaio de dureza, realizados em durômetro tipo Rockwell, na escala C, são mostrados na Tabela 3.

Tab. 3 – Dureza superficial das ligas depositadas (média de 05 medidas)

Material	Dureza Encontrada (HRc)
PFS-420-21	11,8 ±1,8
HVOF-420-4	44,1 ±1,9
WFS-420-St	28,6 ±1,1
WFS-420-Rd	35,1 ±0,8

Fonte: Autor do trabalho (2023).

Anais da VII Mostra de Docentes em RJI

A Tabela 4 apresenta os resultados dos ensaios de desgaste feitos por abrasômetro tipo roda de borracha. Os resultados são uma média de 03 ensaios para cada amostra.

Tab. 4 – Perda de Massa das ligas depositadas (média de 03 ensaios)

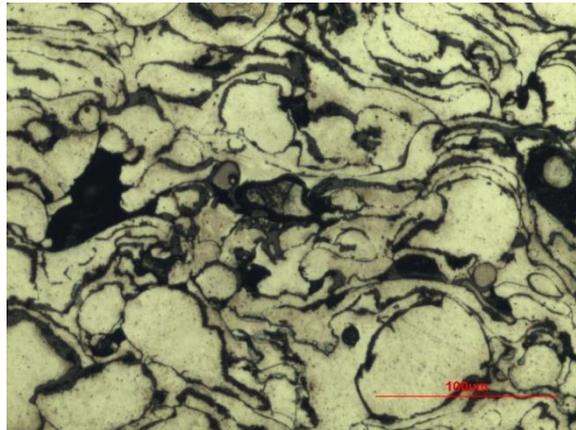
Material	Perda de Massa (mg)
PFS-420-21	146,2±11,3
HVOF-420-4	121,8±2,3
WFS-420-St	151,7±23,9
WFS-420-Rd	128,1±3,6

Fonte: Autor do trabalho (2023).

Os resultados dos ensaios metalográficos podem ser vistos nas figuras a seguir.

A Figura 1 mostra a microestrutura da amostra PFS-420-21 depositada pelo processo Chama Pó. Nota-se a presença de poros (regiões escuras), óxidos (regiões cinzas), partículas não fundidas (fases claras arredondadas) e partículas fundidas depositadas (fases claras achatadas).

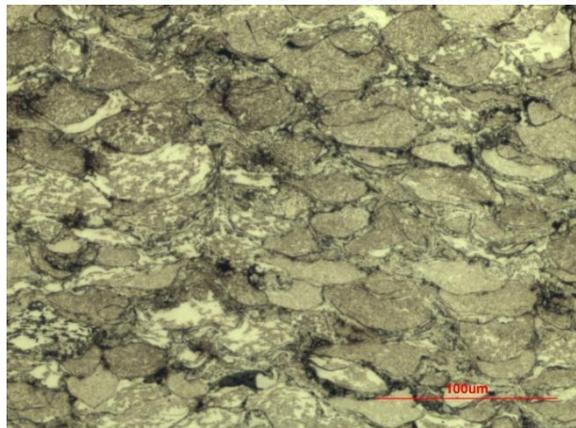
Fig. 1 – Microestrutura da amostra PFS-420-21. Aumento: 200x. Ataque químico: Behara.



Fonte: Autor do trabalho (2023).

A Figura 2 mostra a microestrutura da amostra HVOF-420-4 depositada pelo processo HVOF. Nota-se uma pequena quantidade de poros (regiões escuras), alguns óxidos (regiões de contorno de algumas partículas fundidas), além das partículas fundidas depositadas (fases achatadas). Poucas partículas não fundidas (pequenas fases arredondadas).

Fig. 2 – Microestrutura da amostra HVOF-420-4. Aumento: 200x. Ataque químico: Behara.

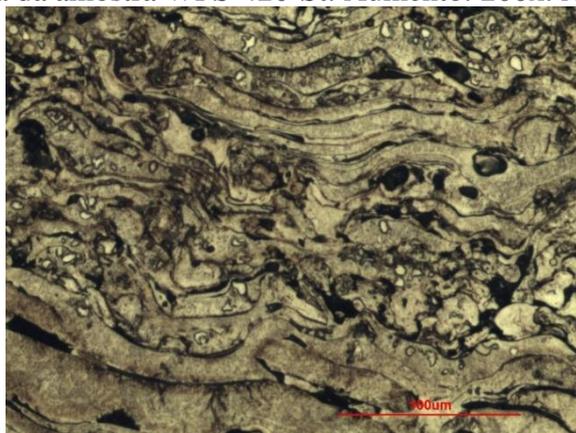


Anais da VII Mostra de Docentes em RJJ

Fonte: Autor do trabalho (2023).

A Figura 3 mostra a microestrutura da amostra WFS-420-St (Chama Arame, sem alterações dos parâmetros do processo). Nota-se a presença de poros dispersos e também entre as camadas depositadas (regiões escuras), óxidos (regiões cinzas) e partículas não fundidas (fases arredondadas). As fases achatadas são as partículas fundidas depositadas. A estrutura em forma de camadas sobrepostas é típica de revestimento por aspensão térmica com arame.

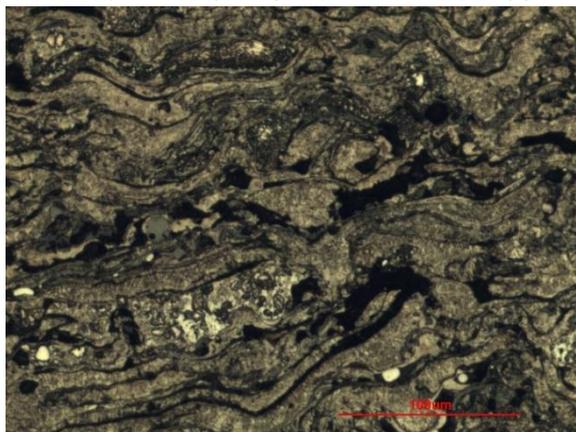
Fig. 3 – Microestrutura da amostra WFS-420-St. Aumento: 200x. Ataque químico: Behara.



Fonte: Autor do trabalho (2023).

A Figura 4 mostra a microestrutura da amostra WFS-420-Rd depositada pelo processo Chama Arame, com alterações dos parâmetros do processo (regulagem diferente da especificada). Nota-se a presença de poros dispersos e também entre as camadas depositadas (regiões escuras), óxidos (regiões cinzas) e partículas não fundidas (fases arredondadas). As fases achatadas são as partículas fundidas depositadas. Pode-se notar, quando comparada com a amostra padrão (WFS-420-St), que a estrutura ficou mais grosseira.

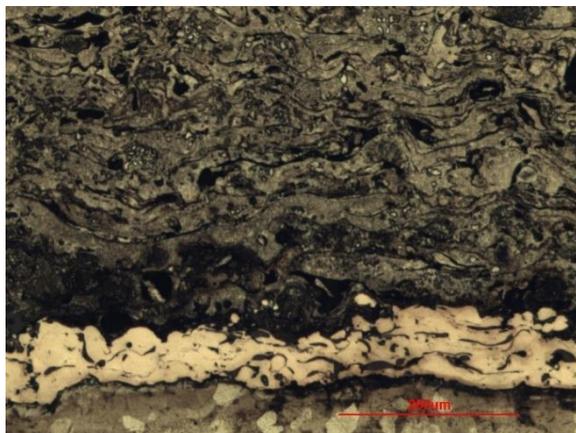
Fig. 4 – Microestrutura da amostra WFS-420-Rd. Aumento: 200x. Ataque químico: Behara.



Fonte: Autor do trabalho (2023).

A Figura 5 destaca a presença da “almofada” (fase clara contínua entre o metal base e o revestimento). A estrutura das “almofadas” nas amostras PFS-420-21, WFS-420-St e WFS-420-Rd apresentaram-se bastante idênticas, daí apenas uma ser mostrada.

Fig. 5 – “Almofada” na amostra PFS-420-21. Aumento: 100x. Ataque químico: Marble.



Fonte: Autor do trabalho (2023).

4. Considerações finais

Baseando-se nas referências e resultados obtidos, podemos considerar que:

- O processo HVOF (HVOF-420-4) apresentou a melhor relação entre dureza, perda de massa e microestrutura. A menor quantidade de porosidade e óxidos e uma maior relação de partículas fundidas reflete nos resultados.

- O processo Chama Pó (PFS-420-21) e o Chama Arame padrão (WFS-420-St) apresentaram propriedades de desgaste bem próximas, mesmo com uma diferença maior de dureza. Esses resultados se aproximam devido aos maiores desvios apresentados.

- A variação dos parâmetros de processo entre as amostras WFS-420-St e WFS-420-Rd, apresentou uma melhora tanto na dureza quanto na perda de massa, apesar da microestrutura ficar bastante parecida.

Diante dos resultados obtidos confirma-se que o HVOF é o melhor processo em relação aos outros estudados, e que a variação de parâmetros pode melhorar as propriedades de dureza e resistência ao desgaste. Outras variações de processos e parâmetros estão sendo estudadas.

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] Metalisation (<https://www.metalisation.com/the-process/>). Acesso em: 19/09/2022.

Anais da VII Mostra de Docentes em RJI

- [6] Thermalspray (<https://www.thermalspray.com/5-types-of-thermal-spray-coating-processes-you-should-know/>). Acesso em: 22/09/2022.
- [7] 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>
- [8] CWST (<https://www.cwst.co.uk/which-type-thermal-spray-coating-is-best-for-your-component/>). Acesso em: 20/09/2022.
- [9] SANCHES, Rafaela G. **Estudo do desgaste abrasivo dos revestimentos de FeMnCrSiB aplicados por Aspersão Térmica Chama a Pó**. 2018. 67 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2018.
- [10] 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>
- [11] 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
- [12] IRS LTD (<https://www.irsltd.co.uk/advantages-and-disadvantages-of-thermal-spray-coatings/>). Acesso em: 29/09/2022.
- [13] 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.
- [14] Chema, 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
- [15] 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.
- [16] Vaz, R. F.; Pukaszewicz, 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