

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

**GABRIEL MEDEIROS BOZZA
LORENZO NEGRELLI FERRARI**

**ANÁLISE DA RESISTÊNCIA À EROÇÃO DE REVESTIMENTOS WC-10Co4Cr
ASPERGIDOS PELOS PROCESSOS HVOF E HVOF.**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA

2021

GABRIEL MEDEIROS BOZZA
LORENZO NEGRELLI FERRARI

**ANÁLISE DA RESISTÊNCIA À EROÇÃO DE REVESTIMENTOS WC-10Co4Cr
ASPERGIDOS PELOS PROCESSOS HVOF E HVOF.**

**ANALYSIS OF EROSION RESISTANCE OF WC-10Co4Cr COATINGS SPRAYED
BY HVOF AND HVOF PROCESSES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Anderson Geraldo Marena Pukasiewicz

PONTA GROSSA

2021



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

GABRIEL MEDEIROS BOZZA
LORENZO NEGRELLI FERRARI

**ANÁLISE DA RESISTÊNCIA À EROÇÃO DE REVESTIMENTOS WC-10Co4Cr
ASPERGIDOS PELOS PROCESSOS HVOF E HVAF.**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentada como requisito para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Mecânica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 16/Dezembro/2021

Anderson Geraldo Marena Pukasiewicz
Doutor em Engenharia e Ciência dos Materiais
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Hipólito Domingo Carvajal Fals
Doutor em Engenharia Mecânica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Marcos Eduardo Soares
Doutor em Engenharia Mecânica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

PONTA GROSSA

2021

“Do.

Or do not.

There is no try.”

– Yoda.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos em especial ao Professor Anderson Geraldo Marena Puckasiewicz, por sua paciência e didática impecáveis em todos os momentos deste projeto, assim como durante nossas graduações; aos colegas de laboratório que compartilharam conhecimentos e esforços; e aos diversos professores que direta ou indiretamente contribuíram para esta conquista.

Agradecemos também à Universidade Tecnológica Federal do Paraná, por possibilitar tamanha oportunidade no meio acadêmico e prover os equipamentos necessários para a pesquisa, ao instituto LACTEC e a *Revesteel* pela deposição dos revestimentos HVOF a Universidade de *West Trollhattan*, em especial ao Engenheiro Stefan Björklund pela deposição dos revestimentos HVOF.

RESUMO

Processos e materiais utilizados na engenharia moderna estão em constante processo de aperfeiçoamento com o objetivo de aumentar a eficiência, reduzindo perdas em de nossas atividades. No que tange às aplicações industriais de turbinas e componentes sujeitos ao fluxo de materiais, a erosão é um dos principais fenômenos a ser mitigado, uma vez que sua ocorrência caracteriza a redução da eficiência e vida útil dos componentes do sistema. Atualmente, entre processos de proteção ou prolongamento da vida útil desses equipamentos está a Aspersão térmica HVOF e HVOF. Neste, o fluxo propulsor das partículas que revestirão o componente em erosão é uma mistura de ar e combustível propelidos em alta velocidade contra uma superfície, naquele, o combustível é misturado com oxigênio puro, produzindo revestimentos de maior densidade e coesão, graças a temperaturas mais elevadas de processo. A determinação das ligas componentes desse revestimento pode ser avaliada em relação ao tipo de ambiente aos quais os componentes mecânicos serão submetidos em operação. Na erosão por *Jato de lama*, é notória a necessidade de revestimentos duros, capazes de suportar o impacto de partículas sólidas de durezas elevadas, como a sílica, por exemplo. Deste modo, optou-se por analisar, o revestimento produzido com liga WC-Cr-Co. As amostras revestidas foram submetidas a teste de erosão por *Jato de lama* utilizando equipamento e normas técnicas específicas para esse ensaio em dois ângulos distintos de ataque, 60° e 90°. Foi realizada a caracterização dos revestimentos com auxílio de Microscópio Eletrônico de Varredura e posterior análise superficial das amostras. Constatou-se que os revestimentos de carboneto de tungstênio depositados pelo processo de HVOF apresentam maior resistência à erosão em relação ao HVOF, enquanto a variação do ângulo de erosão não apresentou diferenças significativas.

Palavras-chave: Aspersão Térmica. HVOF. HVOF. Jato de lama. WC-Cr-Co

ABSTRACT

Processes and materials used in modern engineering are in a constant process of improvement in order to increase efficiency, reducing losses in our activities. With regard to industrial applications of turbines and components subject to the flow of some fluid, erosion is one of the main phenomena to be mitigated, since its occurrence characterizes a reduction in the efficiency and work life of system components. Currently, among processes of protection or extension of the work life of this equipment is the HVOF and HVAF thermal spray. In the later, the propellant fluid of the particles that will coat the eroding component is a mixture of air and fuel propelled at high speed against a surface, in the former, the fuel is mixed with pure oxygen, producing coatings of greater density and cohesion, as a result of higher temperatures of process. The determination of the component alloys of this coating can be evaluated in relation to the type of environment to which the mechanical components will be subject to in operation. In erosion by slurry, the need for hard coatings, capable of withstanding the impact of solid particles of high hardness, such as silica, for example, is evident. Thus, it was decided to analyze the coating produced with WC-Cr-Co alloy. The coated samples were subjected to erosion test by Slurry using equipment and specific technical standards for this test at two different angles, 60° and 90°. The characterization of the coatings was carried out with the aid of a Scanning Electron Microscope and subsequent surface analysis of the samples. It was found that tungsten carbide coatings deposited by the HVAF process have greater resistance to erosion than HVOF, while the erosion angle variation did not show significant differences.

Keywords: Thermal Spray. HVOF. HVAF. Slurry. WC-Cr-Co.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquemático do Hot Gas Expander	15
Figura 2. Palhetas danificadas pela erosão.	15
Figura 3. Processo típico de Aspersão Térmica.....	16
Figura 4. Esquema de formação do revestimento.....	18
Figura 5. Processos de aspersão térmica.....	18
Figura 6. Funcionamento do processo de aspersão.....	19
Figura 7. Esquemca de tocha HVOF	20
Figura 8. Esquema de tocha de Aspersão HVOF.....	20
Figura 9. Mecanismos de erosão.	22
Figura 10. Ângulo de impacto.	22
Figura 11. Efeito do ângulo de impacto nas taxas de erosão	23
Figura 12. Esquema da ponta de diamante em pirâmide do ensaio de microdureza Vickers	33
Figura 13. Esquema de identações nos revestimentos	34
Figura 14. Equipamento para ensaio de Jato de lama.	35
Figura 15. Ensaio com ângulo de 90° e 60°	36
Figura 16. Revestimento de WC-10Co4Cr , amostra de HVOF (B5).	38
Figura 17. Revestimento de WC-10Co4Cr, amostra HVOF (P5).	38
Figura 18. Resultados de Microdureza	40
Figura 19. Perfil da superfície da amostra HVOF em inclinação de 60° antes dos ensaios (t=0s)	42
Figura 20. Perfil da superfície da amostra HVOF em inclinação de 60° após os ensaios (t=480s)	42
Figura 21. Perfil da superfície da amostra HVOF em inclinação de 90° antes dos ensaios (t=0s)	44
Figura 22. Perfil da superfície da amostra HVOF em inclinação de 90° após os ensaios (t=480s)	44
Figura 23. Perda de massa acumulada, amostra HVOF.....	45
Figura 24. Perfil da superfície da amostra HVOF em inclinação de 60° antes dos ensaios (t=0s)	47
Figura 25. Perfil da superfície da amostra HVOF em inclinação de 60° após os ensaios (t=480s)	47
Figura 26. Perfil da superfície da amostra HVOF em inclinação de 90° antes dos ensaios (t=0s).	49
Figura 27. Perfil da superfície da amostra HVOF em inclinação de 90° após os ensaios (t=480s)	49
Figura 28. Perda de massa acumulada, amostra HVOF.....	50
Figura 29. Perda de massa acumulada entre as amostras HVOF e HVOF em ângulo de ensaio de 60°.....	51
Figura 30. Perda de massa acumulada entre as amostras HVOF e HVOF em ângulo de ensaio de 90°.....	52

Figura 31. Parâmetro "Sa" de superfície	53
Figura 32. Parâmetro "Sz" de superfície.	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Observações do modelo de Sundararajan dos mecanismos de erosão para metais dúcteis	25
Tabela 2. Parâmetros de deposição HVAF	30
Tabela 3. Parâmetros de deposição HVOF	30
Tabela 4. Parâmetros de deposição <i>Jato de lama</i>	36
Tabela 5. Porosidade média das amostras	39
Tabela 6. Resultados de Microdureza	39
Tabela 7. Perda de massa, amostra de HVAF em 60°	41
Tabela 8. Parâmetros de superfície, amostra HVAF em 60°	41
Tabela 9. Perda de massa, amostra HVAF em 90°	43
Tabela 10. Parâmetros de superfície, amostra HVAF em 90°	43
Tabela 11. Perda de massa, amostra HVOF em 60°	46
Tabela 12. Parâmetros de superfície, amostra HVOF em 60°	46
Tabela 13. Perda de massa, amostra HVOF em 90°	48
Tabela 14. Parâmetros de superfície, amostra HVOF em 90.	48

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1. TURBINA DE REAPROVEITAMENTO DE ENERGIA CINÉTICA GERADA POR GÁS	14
2.2. O PROCESSO DE ASPERSÃO TÉRMICA	16
2.2.1. Aspersão Térmica HVOF e HVAF	19
2.3. EROSIÃO	20
2.3.1. Desgaste por Jato de Lama.....	26
2.4. LIGAS DEPOSITADAS POR ASPERSÃO TÉRMICA DE ALTA VELOCIDADE	27
3. METODOLOGIA	29
3.1. ASPERSÃO TÉRMICA POR HVOF E HVAF	29
3.2. PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	30
3.3. ANÁLISE METALOGRÁFICA	32
3.4. ANÁLISE NO PERFILÔMETRO	32
3.4.1. Parametros de avaliação	32
3.5. ENSAIO DE MICRODUREZA VICKERS	33
3.6. ENSAIO DE EROSIÃO COM JATO DE LAMA	34
3.7. A REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS	37
4. RESULTADOS	38
4.1. ANÁLISE METALOGRÁFICA	38
4.2. RESULTADOS DOS TESTES DE MICRODUREZA	39
4.3. Amostra WC-10Co4Cr COM HVAF	40
4.3.1. Jato de lama com inclinação em 60°	40
4.3.2. Jato de lama com inclinação em 90°	42
4.4. Amostra WC-10Co4Cr COM HVOF	45
4.4.1. Jato de lama com inclinação em 60°	45
4.4.2. Jato de lama com inclinação em 90°	47
5. CONCLUSÃO	54
6. REFERÊNCIAS	55

1. INTRODUÇÃO

O petróleo é uma matéria prima que dá origem a uma diversidade de outros produtos, encontrado na natureza em seu estado bruto é necessário executar processos de refino para a utilização em processos específicos. Um dos processos de refino mais utilizados é o FCC (*Fluid Catalytic Cracking*) ou crackeamento catalítico fluido, nesse processo as moléculas mais pesadas são quebradas dando origem a outras moléculas mais leves, como a gasolina, querosene, gás liquefeito de petróleo etc. Assim é possível utilizar esses produtos em processos mais refinados e com maior eficácia (DAVID LINDEN, 1996).

É utilizada durante o processo de quebra das moléculas catalisador a base de alumina (Al_2O_3) que ao longo do processo se satura com resíduos a base de carbono, chamados de coque. Para reverter isso é feita a queima do coque para então liberar o catalisador de volta para o processo, para isso é insuflado ar atmosférico através de um compressor axial. Após o processo de combustão e a separação do coque do catalisador ainda resta os gases resultantes dessa reação, em elevado estado energético (DAVID LINDEN, 1996).

Visando o aproveitamento energético desse gás, é utilizado um equipamento chamado *Hot Gas Expander* (expansor de gás quente), esse dispositivo é capaz de aproveitar o gás quente e em alta vazão e transformar em energia mecânica, podendo ser acoplado a um gerador por exemplo. O *Hot Gas Expander* é uma turbina de estágio único que trabalha a temperaturas de 650 a 760°C e pressões de 110 a 240kPa e vazão mássica de até 775.000kg/h (DOWNSON; DOWNSON, 2009).

O problema, porém, é que o gás utilizado na turbina não é 100% limpo, mesmo passando por processos de filtragem, partículas sólidas resultantes do processo de combustão do coque e o catalisador ficam em suspensão e colidem nas pás da turbina causando danos, dentre eles o por erosão.

Uma das maneiras de minimizar os danos é a aplicação de revestimentos de alta resistência nas pás da turbina, esses revestimentos podem ser aplicados por aspersão térmica. Nos estudos realizados na universidade são realizados os processos de aspersão térmica do tipo HVOF (*High Velocity Oxy Fuel*) e HVOF (*High Velocity Air Fuel*), esses processos permitem a deposição de uma fina camada de

material de alta resistência nas pás da turbina, aumentando a sua resistência a erosão, sendo o HVOF e HVAF capaz de depositar camadas de até 100um, evitando assim que se tenha alguma alteração na geometria das peças.

O objetivo do estudo é comparar o desempenho de dois diferentes processos de aspersão térmica, HVAF e HVOF em produzir revestimentos resistentes à erosão.

Como objetivos específicos, busca-se maior entendimento da influência que a variação do ângulo de erosão aliada a diferentes processos de aspersão ocasiona à perda de massa durante a erosão e à evolução da rugosidade superficial dos revestimentos. Aliado à isso, busca-se entender como a porosidade relativa e a microdureza dos revestimentos influenciam o desempenho das ligas sob erosão *Slurry*.

2. REFERÊNCIAL TEÓRICO

A engenharia de superfícies tem sido comumente utilizada tanto para a recuperação de superfícies danificadas quanto para a melhoria de limitações existentes nas ligas empregadas nos mais diversos setores da indústria

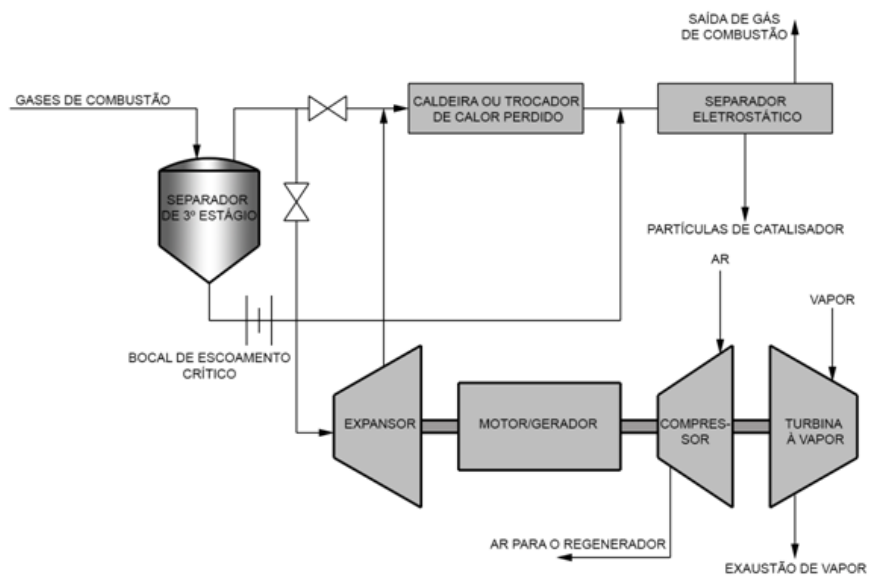
2.1. TURBINA DE REAPROVEITAMENTO DE ENERGIA CINÉTICA GERADA POR GÁS

O processo de combustão do coque para a recuperação do elemento catalisador no processo FCC para o refino do petróleo gera uma grande massa de ar a temperaturas elevadas, na faixa dos 650 a 760°C e pressões de 101 a 240KPa. Apesar da pressão relativamente baixa, o alto volume dos gases aliado à alta temperatura possibilita gerar energia através de uma turbina, o Hot Mass Expander. Essa energia pode ser aproveitada para gerar energia elétrica se acoplado um gerador no eixo da turbina ou até mesmo acionar o compressor axial (*blower*) que fornece o ar para a execução da combustão.

Na **Figura 1** é esquematizado o sistema de “*crackeamento*” FCC em conjunto com a turbina que reaproveita os gases do regenerador. Antes de ir para a turbina os gases passam por separadores a fim de diminuir a quantidade de partículas sólidas em suspensão, essas partículas são prejudiciais, pois ao colidirem com as pás da turbina causam a erosão das mesmas causando danos às peças, como mostra a **Figura 2**. Apesar de haver mecanismos anteriores para a retirada dessas partículas suspensas eles não são capazes de retirar totalmente as partículas.

Acoplados ao eixo da turbina podem ser instalados geradores e até mesmo o *blower* para aproveitar o trabalho produzido.

Figura 1. Esquemático do Hot Gas Expander



Fonte: Adaptado de Bloch *et al* (2001).

Os sólidos em suspensão são compostos basicamente de alumina e outros óxidos, sílica e argila, por serem partículas de dureza elevada ao colidirem com as pás da turbina causam a erosão do material, danificando-as e causando prejuízos para o processo.

Figura 2. Palhetas danificadas pela erosão.



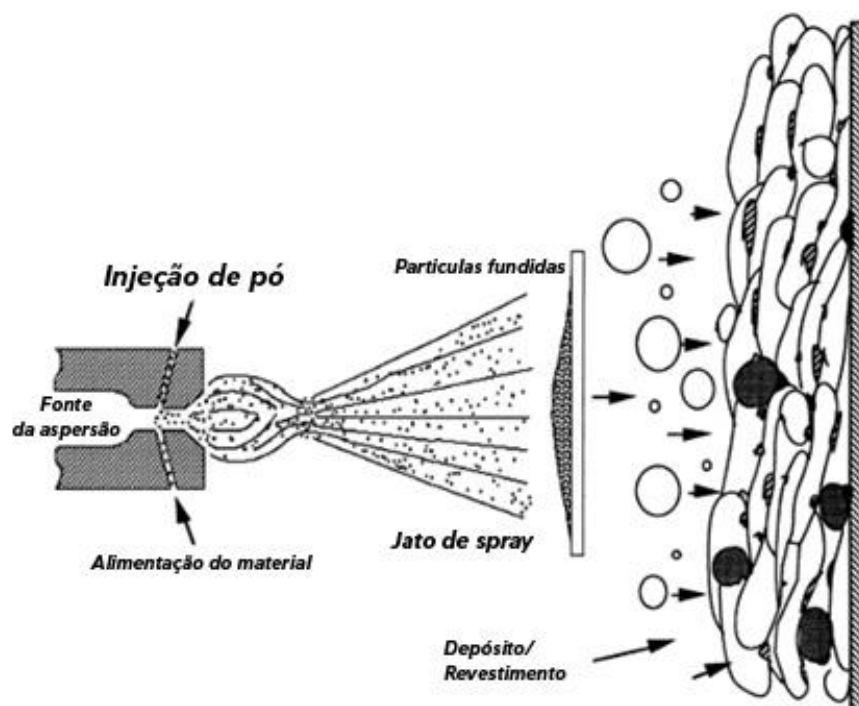
Fonte: Adaptado de Lima, Trevisan (2017).

2.2. O PROCESSO DE ASPERSÃO TÉRMICA

A adição de revestimentos em uma superfície visando melhorar sua resistência às adversidades da operação, como o desgaste, a corrosão, a degradação térmica ou a erosão, por exemplo, tem se mostrado um campo promissor na engenharia de novas máquinas e equipamentos. Em particular, a aspersão térmica mostra-se adequada para atender os mais diversos requisitos destas superfícies, exibindo não apenas benefícios contra as adversidades já mencionadas, como também atendendo as exigências da própria superfície no que tange às suas limitações de processo, como o ponto de fusão do substrato, o coeficiente de expansão térmica e a compatibilidade química entre os materiais. (DAVIS, 2004)

A **Figura 3** mostra o funcionamento básico de um processo de aspersão térmica. Podem-se notar as partículas de revestimento sendo lançadas contra a superfície do material base (substrato) e sua característica formação lamelar de revestimento.

Figura 3. Processo típico de Aspersão Térmica



Fonte: Adaptado de Davis (2004).

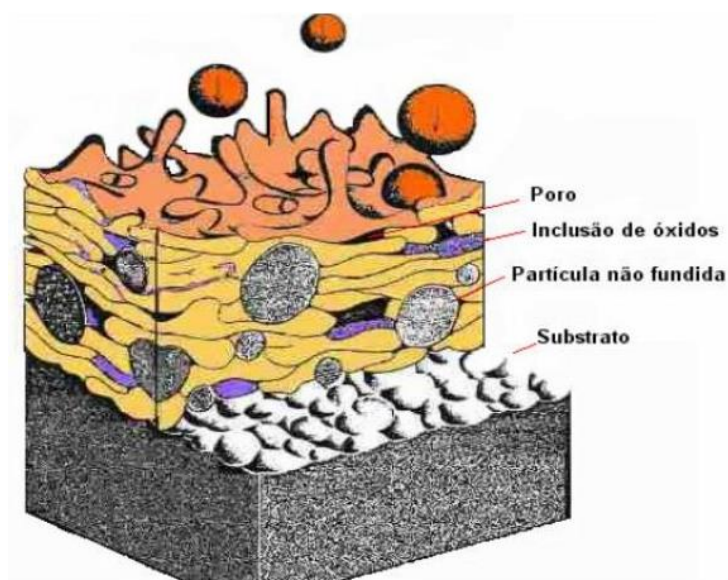
O processo de aspersão térmica é também caracterizado pela forma de deposição do material, sendo este um processo não atômico, isto é, a deposição não ocorre pela transferência átomo por átomo do material, em oposição a outros processos como o EB-PVD (*eléctron beam physical vapor deposition*), mas sim pela transferência mássica relativamente alta de material, por vezes em formato de gotas líquidas ou semissólidas (LIMA e TREVISAN, 2007).

Outra característica marcante dos processos de aspersão térmica é a não ocorrência de mistura entre o revestimento adicionado e a material base, conferindo a característica de 'sobre camada'. (DAVIS, 2004). Esta "sobre camada" adere mecanicamente ao material base e imediatamente recebe a próxima camada de partículas que vão sucessivamente acumulando até atingir a espessura final desejada. (FAUCHAIS, HEBERLEIN e BOULOS, 2014) . A **Figura 4** ilustra este processo.

Nota-se a formação de poros entre as camadas assim como a presença de partículas não fundidas durante a aspersão. Além destas, podemos ter ainda inclusões de óxidos, formação de grãos e interfaces Inter lamelares, e trincas no revestimento. (DAVIS, 2004).

A presença de poros no revestimento pode ser uma característica desejada no processo, porém as discussões acadêmicas estão frequentemente associadas ao excesso de porosidade, uma vez que esta pode causar baixa adesão do revestimento e possibilitar taxas mais elevadas de corrosão e desgaste. Além disso, em muitas aplicações os revestimentos devem ser usinados após aspersão, a fim de obter determinadas características superficiais. A presença de poros pode comprometer esta preparação superficial. O controle da porosidade é então de grande importância para o processo, e podemos defini-lo como em função da distribuição dos tamanhos de partícula, do método de fabricação dos insumos, a taxa de fusão das partículas aspergidas e seu ângulo de impacto. Por outro lado, a formação de porosidade relacionada aos óxidos presentes no substrato pode ser reduzida aumentando a velocidade ou a energia de impacto do processo. (DAVIS, 2004)

Figura 4. Esquema de formação do revestimento.



Fonte: Vicenzi (2007).

A alimentação dos processos geralmente ocorre com o uso de arames, hastes ou pós que passam por um instrumento de aquecimento que possibilitará sua fusão total ou parcial, sendo então atomizados em direção à superfície do substrato. O método de aquecimento e propulsão das partículas frequentemente envolve o uso de arco-elétrico, jato de plasma ou chama.

Estes diferentes modos de operação definem a classificação do processo de aspersão. A **Figura 5** esquematiza as variações comumente utilizadas dos processos.

Figura 5. Processos de aspersão térmica



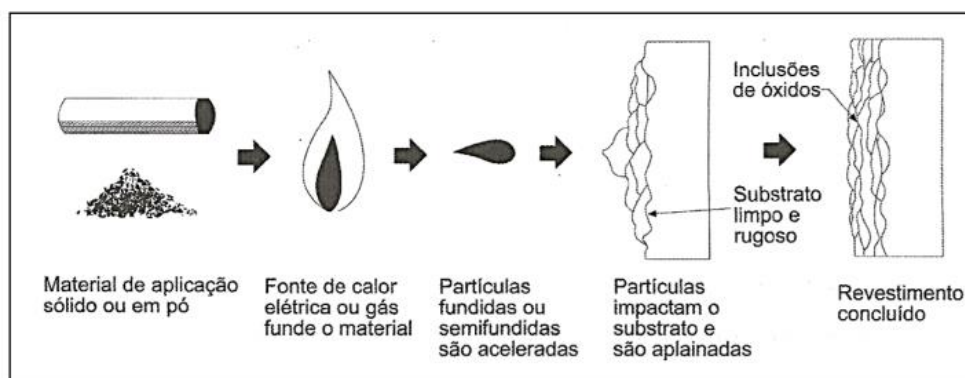
Fonte: Adaptado de DAVIS (2004).

2.2.1. ASPERSÃO TÉRMICA HVOF E HVAF

O processo de aspersão consiste na deposição de materiais metálicos ou não metálicos em uma condição fundida ou semifundida sobre uma superfície preparada. Os materiais de revestimento podem ser usados na forma de pó, arame ou vareta. (LIMA, TREVISAN, 2007).

O material aspergido é aquecido e depois propelido para a superfície a ser revestida, o impacto em alta velocidade faz com que o material do revestimento se deforme e adira à superfície da peça.

Figura 6. Funcionamento do processo de aspersão.

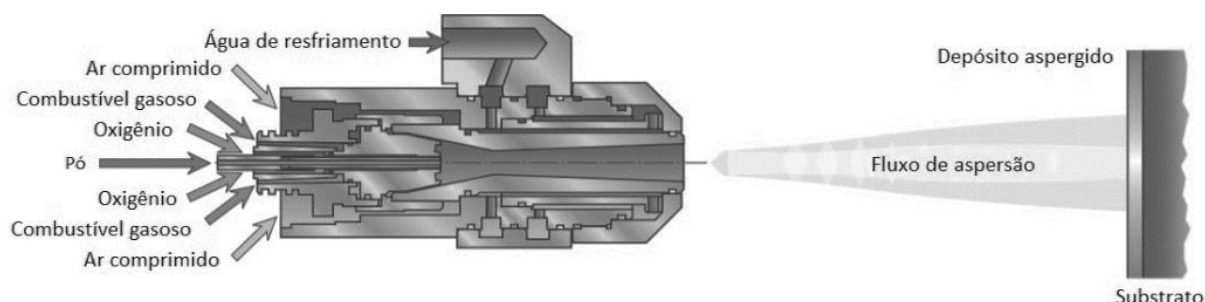


Fonte: Adaptado de LIMA, TREVISAN (2007).

Existem vários métodos para realizar o aquecimento e a propulsão do material de revestimento, podendo ser realizado desde uma combustão por chama convencional, ou até mesmo com a utilização de um arco elétrico para fundir o material e ar comprimido para propeli-lo. Os métodos avaliados nesse projeto são o HVOF, *High Velocity Oxi-Fuel* (Oxicombustível de Alta Velocidade) e o HVAF, *High Velocity Air Fuel* (Ar-combustível de alta velocidade), nesses sistemas há a injeção de combustível e oxigênio, ou combustível e ar, a pressões elevadas, de 6-10 bar nos sistemas HVOF e cerca de 20 bars nos sistemas HVAF, com a chama atingindo velocidades supersônicas, variando de 1500 a 2000m/s. Essa chama é direcionada para o bocal de saída, e leva consigo partículas do pó de revestimento. As partículas são impulsionadas a 500 e 800m/s e devido à relativa baixa temperatura da chama (2900°C) a utilização de materiais cerâmicos e alguns metais refratários se torna mais difícil. [LIMA, TREVISAN, 2017].

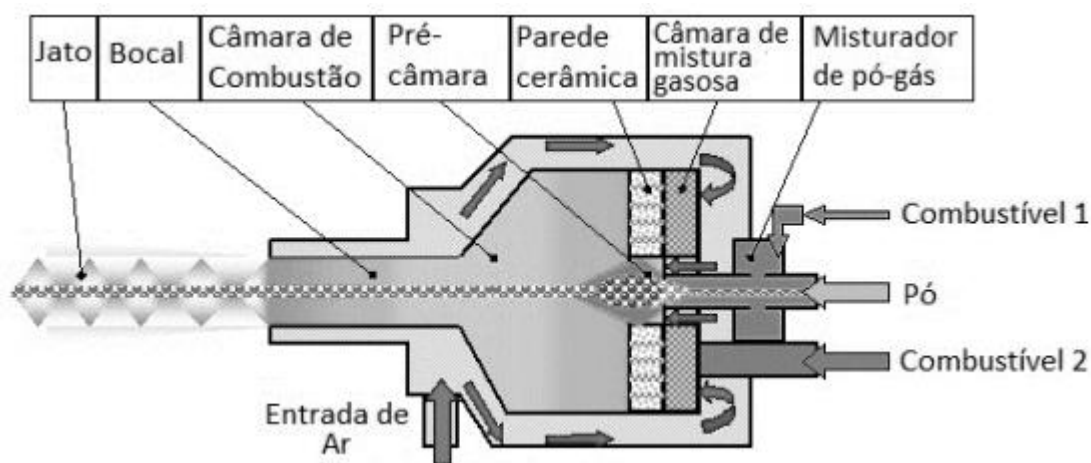
As **Figura 7** e **Figura 8** representam modelos de tochas de aspersão HVOF e HVOF.

Figura 7. Esquemata de tocha HVOF



Fonte: SILVEIRA (2018).

Figura 8. Esquemata de tocha de Aspersão HVOF.



Fonte: SILVEIRA (2018).

2.3. EROSÃO

A erosão é um fenômeno que ocorre em componentes de máquinas e equipamentos em contato com partículas sólidas em movimento ou pelo escoamento de um fluido, que pode eventualmente conter partículas ocasionando tal modo de desgaste. Stachowiak difere a erosão da abrasão considerando que, na erosão, as partículas sólidas impactam contra a superfície sujeita ao desgaste, enquanto na abrasão as partículas apenas deslizam sobre a superfície (STACHOWIAK, 2014, p. 525-526). Outra diferenciação entre o desgaste por erosão e o por abrasão é dado por Hutchings e Shipway em seu trabalho sobre tribologia (HUTCHINGS e

SHIPWAY, 2017, p. 206), nele, os autores discorrem sobre como a erosão se dá pelo impacto de partículas sujeitas a forças variadas enquanto a abrasão se dá pelo deslizamento de partículas aprisionadas entre duas superfícies, nesta situação a força exercida sobre as partículas é à força de pressão entre as superfícies.

A erosão ainda pode se manifestar como erosão adesiva, abrasiva ou líquida. A erosão abrasiva, ocorre quando material é removido da superfície em decorrência das forças resultantes do impacto de partículas sólidas contra a superfície. (ASKELAND, 2011)

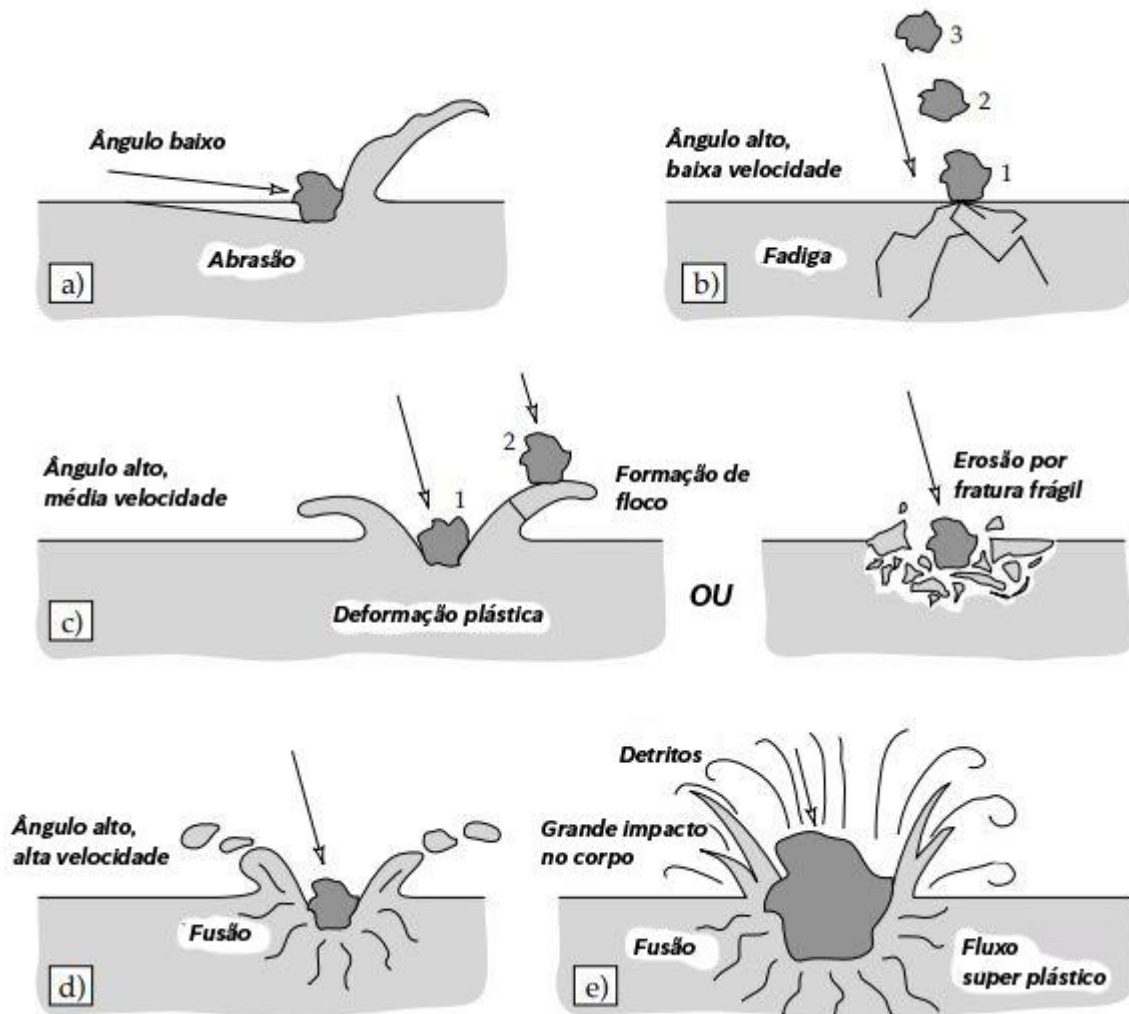
O entendimento atual dos vários mecanismos que atuam no processo de erosão é notoriamente empírico e podemos citar as principais variáveis conhecidas da erosão como sendo: ângulo de impacto, velocidade e tamanho da partícula.

A redução do desgaste por erosão requer um estudo de caso detalhado dos sistemas de interesse, uma vez que o aumento de resistência mecânica por si só não necessariamente garante boa resistência à erosão. Estudos mostram inclusive que, as propriedades das partículas causadoras de erosão devem ser levadas em consideração na análise (STACHOWIAK, 2014, p. 553). A seguir, podemos ver como estas variáveis interagem no processo de desgaste.

Nos modelos (a) e (b) da **Figura 9**, comparamos o impacto das partículas com baixo ângulo de impacto em relação à superfície (a) e com um elevado ângulo de impacto (b).

Baixos ângulos de impacto tendem a causar desgaste por abrasão, pois a partícula percorre um breve caminho no sentido da superfície durante o impacto. Em contraste, elevados ângulos de impacto caracterizam um processo típico de erosão causando fadiga localizada nas regiões de impacto constante. O fenômeno de fadiga localizada está relacionado também à velocidade de impacto das partículas. Se a velocidade for relativamente alta, pode ocorrer deformação plástica do material da superfície (c). Materiais frágeis poderão apresentar trincas nas regiões imediatamente abaixo à superfície, fratura frágil então, ocorrerá. Já nas figuras (d) e (e) podemos visualizar um caso de velocidade extrema, que pode levar inclusive à fusão do material da superfície afetada (d) e os efeitos causados por partículas de tamanho elevado (e).

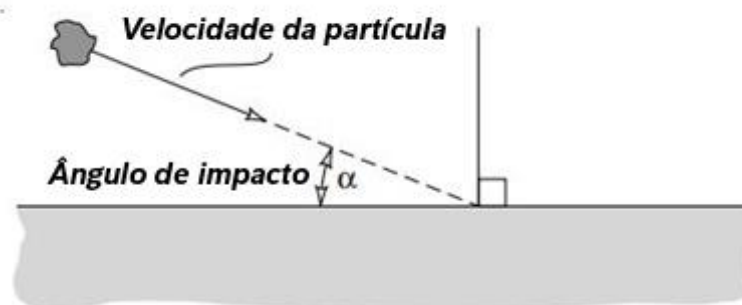
Figura 9. Mecanismos de erosão.



Fonte: Adaptado de STACHOWIAK (2014).

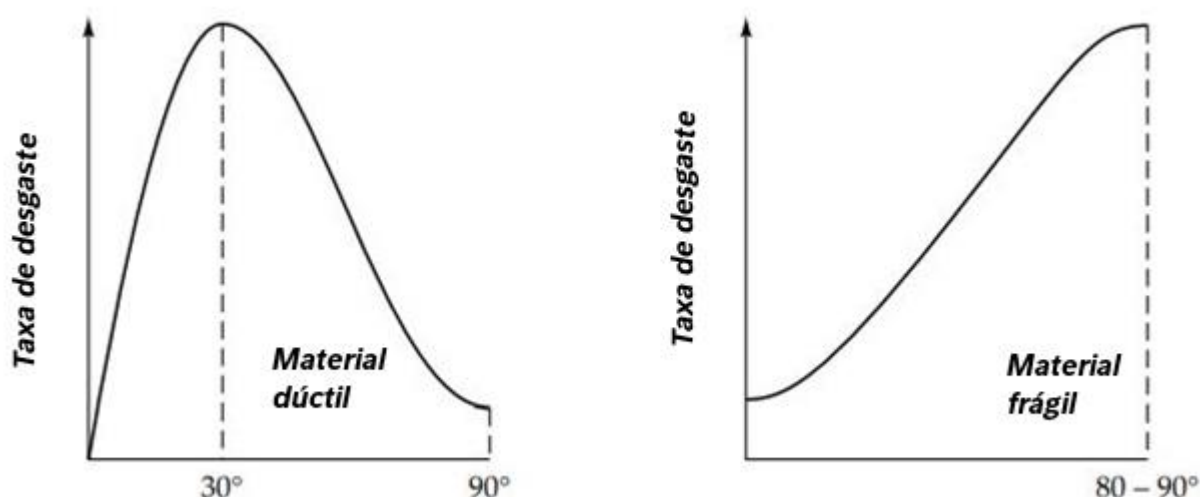
Os ângulos de impacto maiores que 0° (**Figura 10**) já podem causar danos por erosão à superfície do material.

Figura 10. Ângulo de impacto.



Fonte: Adaptado de STACHOWIAK (2014).

Figura 11. Efeito do ângulo de impacto nas taxas de erosão



Fonte: Adaptado de STACHOWIAK (2014).

Ainda de acordo com Stachowiack, a relação entre taxa de impacto e velocidade de partículas pode ser expressa pela Equação 1 a seguir:

$$-\frac{dm}{dt} = kv^n$$

Equação 1. Perda de massa por erosão (STACHOWIAK, 2014)

Onde “ k ” é uma constante empírica característica do tipo de partícula; “ n ” é um expoente de velocidade e representa a energia cinética das partículas; normalmente variando entre 2 e 3 para partículas sólidas (LIU, 2003, p. 5); enquanto “ v ” é a velocidade das partículas. Podemos concluir por uma análise rápida da relação matemática entre a taxa de erosão e velocidade das partículas que um aumento de 10x em velocidade ocasionará um aumento entre 100x e 1000x na taxa de erosão (STACHOWIAK, 2014, p. 553-555).

Diversos autores estudaram os fenômenos decorrentes da erosão e buscaram encontrar um modelo que pudesse prever a taxa de erosão em relação às variáveis que ocorrem durante o processo. Xuwen Liu (LIU,2003) em seu estudo sobre a erosão de materiais dúcteis e frágeis, cita o modelo de Finnie, que considera a perda de massa por erosão através da quantidade de movimento das partículas erosivas, considerando assim o caso em que a partícula após impacto deixa a superfície enquanto ainda está cortando-a (Equação 2), e o caso em que a partícula

encontra repouso ao cortar a superfície (Equação 3).

$$V = \frac{cMU^2}{2\psi p} \left[\frac{2}{K} \left(\sin 2\alpha - \frac{2}{p} \sin^2 \alpha \right) \right], \quad \alpha \leq \tan^{-1} \frac{P}{2}$$

Equação 2. Perda de volume em função da massa das partículas de impacto (caso1) (LIU, 2003, p. 4)

$$V = \frac{cMU^2}{2\psi p} \left[\frac{\cos^2 \alpha}{1 + \frac{mr^2}{I}} \right], \quad \alpha \geq \tan^{-1} \frac{P}{2}$$

Equação 3. Perda de volume em função da massa das partículas de impacto (caso2) (LIU, 2003, p. 5)

Neste modelo, afirma-se que para ângulos de impacto $\alpha > 45^\circ$ os resultados mostram-se distantes da realidade, devendo, portanto, a análise limitar-se a ângulos de impacto menores (FINNIE, 1960, p. 95), até porque, segundo Liu, com ângulos de incidência maiores que 45° a maior parte do material impactado pela partícula não será removido, mas apenas descolado da superfície. (LIU, 2003, p. 5).

Com o desenvolvimento de microscópios mais poderosos, como ,por exemplo, o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), a análise dos mecanismos de erosão ficou ainda mais detalhada. Sundararajan (SUNDARARAJAN e SHEMON,1983) propôs em 1983, um novo modelo para estudo dos mecanismos de erosão. Neste modelo, ele enfatiza as altas tensões que ocorrem na deformação da superfície, sob condições adiabáticas de deformação, e afirma, portanto, que a resposta mecânica da superfície à deformação será dinâmica. Ao analisar a deformação de materiais com auxílio do MEV, constatou a formação de crateras com regiões de altas tensões ao redor das regiões de impacto, semelhantes a plaquetas ou elevações em forma de abas ao redor da região. Concluiu então que a erosão de materiais dúcteis esta intimamente relacionada a estas formações. As considerações do modelo elaborado por Sundararajan podem ser analisadas através da **Tabela 1**.

Tabela 1. Observações do modelo de Sundararajan dos mecanismos de erosão para metais dúcteis

Observações
(<i>E</i> é a taxa adimensional de erosão [gramas de massa perdida/ gramas do erosivo])
1. <i>E</i> varia conforme (<i>velocidade de impacto</i>) ^{<i>n</i>} , onde “ <i>n</i> ” está geralmente entre 2,2 a 3,0 (valor médio de 2,4).
2. Um máximo na taxa de erosão para metais dúcteis é encontrado em um ângulo de impacto de 15° a 30°, ou no caso de aço endurecido na faixa de 60° a 90°.
3. Para uma determinada liga, <i>E</i> não é alterado por grandes aumentos na dureza adquirida por tratamento térmico, envelhecimento ou trabalho a frio.
4. Em baixa velocidade de impacto, <i>v</i> , nota-se um tempo de incubação que aumenta aproximadamente à medida que .
5. Ocorre uma excelente correlação entre a taxa de erosão e as propriedades termo físico do metal alvo, ou seja, o calor para elevar o metal alvo ao seu ponto de fusão.
6. A perda erosiva de metais dúcteis está intimamente relacionada à formação e fratura das abas e / ou plaquetas formadas em torno dos locais de impacto.

Fonte: Adaptado de (LIU, 2003)

Os modelos propostos por Finnie e Sundararajan retratam com certa precisão o que ocorre nos fenômenos práticos de erosão, e Hutchings e Shipway resumem as análises citada anteriormente em seu trabalho sobre tribologia de superfícies por meio da seguinte relação:

$$E = \frac{K\rho U^2}{H} f(\theta)$$

Equação 4. Volume de material removido em função do ângulo de impacto. (HUTCHINGS e SHIPWAY, 2017, p. 213)

Em que *K* depende da geometria das partículas e das partes idealizadas das partículas que efetivamente produzem o efeito de corte nas superfícies, *H* representa a dureza do material e a função *f*(*θ*) foi prevista na teoria dos autores supramencionados e pode ser representada pela curva observada experimentalmente e retratada na Equação 5. Nota-se que o expoente de velocidade 2, foi utilizado de modo a respeitar o limite estabelecido por Xuwen citado anteriormente neste trabalho, podemos naturalmente inserir tal expoente como uma

variável a ser analisada caso a caso, deste modo, nossa relação entre o volume de material removido, ângulo de impacto e velocidade de partícula seria:

$$E = \frac{K\rho U^n}{H} f_1(\theta)$$

Equação 5. Volume de material removido em função do ângulo de impacto e da velocidade de partículas (HUTCHINGS e SHIPWAY, 2017, p. 213)

Com a inserção da variável n ao invés do expoente fixo 2, tratamos a equação como um modelo menos idealizado e, portanto, mais próximo à realidade, pois ele representa a possibilidade de variação da movimentação do ponto de ação de forças das partículas na superfície.

Estas relações para a taxa de remoção mássica de material são modelos idealizados capazes de representar a realidade para ângulos de incidência relativamente baixos, pois são estes ângulos baixos que permitem o fenômeno de ‘corte’ das partículas na superfície. Quando trabalhamos com casos de ângulo de incidência maiores, devemos considerar modelos que levam em conta não o ‘corte’ da superfície pelas partículas, mas sim a deformação repetitiva ocasionada por impactos mais perpendiculares à superfície. Em casos extremos de ângulos próximos a 90° , duas situações surgem desta assertiva, a primeira envolve o deslocamento de material com a repetição do impacto em ângulos próximos ao ângulo reto, outra envolve tratar o problema com um ciclo de fadiga baixo, causado pela deformação plástica cíclica que ocorrerá nos pontos de impacto. Segundo os autores de *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials*, a nova relação para estes casos, com as devidas considerações será dada por:

$$E = \frac{K_2 \rho \sigma^{1/2} U^3}{\varepsilon_C^2 H^{3/2}}$$

Onde σ é a densidade das partículas erosivas, ..

2.3.1. DESGASTE POR JATO DE LAMA

Jato de lama é comumente definido como uma mistura de partículas líquida e sólidas, atuando durante o transporte do material desejado (OJALA, VALTONEN, *et al.*, 2016). A erosão causada por meio da ação dessa combinação representa considerável custo econômico em instalações que utilizam turbinas para geração de energia, uma vez que as turbinas dependem do fluxo de um fluido que contém, por

vezes, partículas com microdurezas superiores a 1100 HV (GOYAL, SINGH, *et al.*, 2012).

A aplicação de revestimentos aspergidos para reduzir o efeito corrosivo das partículas que são carregadas pelo fluido estão ganhando notoriedade, uma vez que tem se provado como alternativa eficiente para reduzir a taxa de erosão componentes importantes nas indústrias e usinas de energia.

O sucesso da proteção proveniente do revestimento aplicado varia amplamente com o processo de deposição adotado assim como propriedades físicas e químicas dos materiais escolhidos para compor o revestimento.

Os processos de deposição por HVOF (*High velocity oxygen fuel*) e HVAF (*High velocity air fuel*) são capazes de originar revestimentos com excelentes propriedades mecânicas quando comparado a outros processos de deposição

2.4. LIGAS DEPOSITADAS POR ASPERSÃO TÉRMICA DE ALTA VELOCIDADE

A utilização de processos de aspersão térmica de revestimentos em componentes sujeitos ao desgaste demanda uma seleção cuidadosa das ligas que comporão as camadas de proteção do material, uma vez que a operação desses equipamentos é sujeita não apenas às ações dos desgastes químico e mecânico, mas também a elevados gradientes térmicos durante operação. (JANKA, BERGER, *et al.*, 2018, p. 296)

Estudos apontam para o uso de compostos baseados em carboneto de tungstênio (como WC-12C) assim como ligas com adição de carboneto de cromo (WC-10Co-4Cr) (JANKA, BERGER, *et al.*, 2018) como possíveis alternativas para revestimentos protetores em ambientes sujeitos a ataques químicos e mecânicos; contudo, a utilização destas ligas encontra limitações em altas temperaturas de operação, já que o carboneto de tungstênio apresenta menor estabilidade química quando submetidos a elevadas temperaturas além dos compostos apresentarem incompatibilidade em seus coeficientes de expansão térmica, podendo apresentar delaminação dos revestimentos (JANKA, BERGER, *et al.*, 2018).

Estudos apontam também, para a utilização do carboneto de cromo (Cr_3C_2)

uma vez que estes apresentam estabilidade térmica superior às ligas de carboneto de tungstênio (WC), assim como coeficientes de expansão térmica semelhantes aos da fase ferrítica do aço, evitando problemas de delaminação do revestimento.

A utilização de processos de baixa densidade, e conseqüente baixa porosidade, como HVOF, fornece as condições necessárias para a formação destas inclusões de carbeto finos na malha do revestimento, especialmente quando comparados a processos de deposição a plasma, por exemplo. (JI, LI, *et al.*, 2006, p. 6749)

Carbetos de Tungstênio, oferecem melhor resistência ao desgaste assim como durezas mais elevadas em relação aos Carbonetos de Cromo, tendo, contudo, menor temperatura de operação. (MATIKAINEN, PEREGRINA, *et al.*, 2019)

3. METODOLOGIA

Este trabalho foi executado de forma experimental tendo uma abordagem qualitativa e quantitativa.

Foi analisado nos experimentos amostras com revestimentos depositados por HVOF e HVOF tendo em sua composição o WC 10Co4Cr, sendo avaliado a sua resistência à erosão de acordo com os ensaios de *Jato de lama* executados no laboratório de materiais da universidade.

Nesse capítulo, portanto, será descrito os procedimentos metodológicos utilizados, desde a preparação das amostras, caracterização das propriedades mecânicas e da execução dos ensaios de erosão por jato de lama. Todo o processo se encontra descrito nos próximos tópicos.

3.1. ASPERSÃO TÉRMICA POR HVOF E HVOF

As amostras utilizadas nesse estudo foram revestidas pelo processo de aspersão térmica HVOF e HVOF.

As amostras com deposições em equipamento HVOF foram realizadas em parceria com a Universidade de West, localizada na cidade de Trollhättan, Suécia, com auxílio do Engenheiro Stefan Björklund. Já as amostras de HVOF foram realizadas em cooperação com a Revesteel Metalizações, empresa de especializada em revestimentos.

Por ter trabalhado em conjunto com outros acadêmicos da universidade, esse estudo não contempla a execução da aspersão dos revestimentos, apenas as etapas posteriores, todavia, todo o processo de aspersão e sua caracterização já foram detalhada no referencial teórico.

Os parâmetros usados na deposição dos revestimentos foram:

Tabela 2. Parâmetros de deposição HVAF

Parâmetros	HVAF
Tipo de pistola	M3
Pressão de ar (MPa)	11,3
Fluxo de Propano (1/min)	97,0
Fluxo de gás de arraste (1/min)	50,0
Taxa de alimentação do pó (g/min)	90,0
Distância de aspersão (mm)	300,0

Fonte: Adaptado de Silveira et al. (2017).

Tabela 3. Parâmetros de deposição HVOF

Parâmetros	HVOF
Tipo de pistola	DJ-2700
Pressão de Oxigênio (MPa)	1,034
Fluxo de Oxigênio (1/min)	265,4
Pressão de Propileno (MPa)	0,689
Fluxo de Propileno (1/min)	71,4
Fluxo do gás de arraste (1/min)	60,0
Pressão do ar (MPa)	0,517
Vazão do ar (1/min)	317,0
Taxa de alimentação do pó (g/min)	45,0
Velocidade de deposição (m/s)	1,26
Distância de aspersão (mm)	200,0

Fonte: Adaptado de Sucharski et al. (2015).

3.2. PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Antes de dar início aos ensaios de erosão, as amostras foram preparadas para serem analisadas as suas propriedades e estarem aptas a terem o ensaio realizado. Foram disponibilizados para o estudo amostras cilíndricas com 25 mm de diâmetro e 6 mm de espessura, assim como amostras quadradas com 35x50 mm. Os cortes foram realizados no laboratório de preparação metalográfica da universidade usando a cortadeira de precisão modelo *ISOMET 4000* da *Buehler* usando disco de corte próprio para materiais de alta dureza fornecido pela própria fabricante do equipamento.

Em seguida as amostras foram levadas para a etapa de preparação de superfície, a fim de se obter uma superfície lisa e uniforme para realização das

análises metalográficas e os ensaios de erosão em sequência.

Para essa etapa foi utilizada a lixadeira e politriz *Buehler Beta* localizada no mesmo laboratório da etapa anterior

No processo de lixamento foram utilizadas lixas de diamante de granulometria 220, 600 e 1200 mesh, todo o processo foi realizado tendo água corrente como lubrificante e a rotação da mesa giratória variando de 100 a 500 rpm, de acordo com a necessidade. Por tratar-se de amostras com dimensões incomuns, visto que à época da realização dos experimentos a máquina de *Jato de lama* havia recém chegado ao laboratório, todo o processo teve de ser realizado manualmente, pois as amostras não encaixavam no rotor automático do equipamento.

Por fim, para o polimento final foi utilizado uma boina com líquido abrasivo com suspensão de diamante de 1 e 0,25 μ m, obtendo uma superfície mais uniforme e lisa quanto possível.

Em todas as etapas de análise foram realizadas a limpeza e pesagem das amostras, vistos que o objetivo do estudo era analisar a perda de massa após os ensaios.

Sendo assim, a limpeza foi minuciosa para evitar que qualquer partícula de impureza, desde restos de material particulado proveniente do lixamento como material desprendido ou areia do ensaio de erosão, causasse alguma medida de massa imprecisa, afetando a qualidade dos dados.

Sendo assim, primeiramente todas as amostras foram lavadas em água corrente e detergente, para que as partículas mais grossas e gorduras fossem removidas, em seguida as amostras foram levadas a cuba de ultrassom imersas em acetona ficando por 15 minutos, para remover as partículas menores ainda presas nas amostras. Em seguida, as amostras foram lavadas com álcool etílico 99% para remover qualquer resto de impureza, sendo aquecidas com um secador e posteriormente colocadas na câmara de vácuo por 20min para que qualquer umidade retida nas amostras fosse removida.

Com as amostras totalmente limpas foi realizada a pesagem das mesmas, utilizando a balança de precisão do laboratório utilizado nas outras etapas e também outra balança de precisão localizada no laboratório de materiais, para mitigar qualquer vício nas pesagens. Em cada balança foi realizado para cada amostra cinco medições e retirada média aritmética delas.

Os processos de limpeza e pesagem foram repetidos em todos os intervalos dos ensaios e em todas as amostras.

3.3. ANÁLISE METALOGRÁFICA

Com o objetivo de compreender a formação lamelar dos revestimentos em estudo, assim como avaliar a presença de defeitos nas camadas depositadas, realizou-se a análise metalográfica dos corpos de prova.

Com auxílio do Microscópio Eletrônico de Varredura, modelo TESCAN VEGA 3, obtiveram-se imagens detalhadas das microestruturas formadas, favorecendo maior compreensão nos resultados deste trabalho.

3.4. ANÁLISE NO PERFILÔMETRO

Para melhor entender o impacto causado na superfície das amostras recorremos a análise por perfilometria ótica 3D com auxílio do equipamento disponível no laboratório de análise metalográfica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

O equipamento, modelo *Taylor Hobson*, é capaz de registrar com precisão o relevo das superfícies analisadas sem haver contato entre o equipamento e a amostra, fornecendo resultados confiáveis independentemente do nível de rugosidade ou paralelismo dos corpos de prova.

Utilizamos os resultados de leitura desse equipamento para melhor avaliar o nível de deformação ocasionado aos corpos de prova e, com isso, buscar entender as possíveis relações existentes entre a erosão por *Jato de lama* e alterações na superfície dos corpos.

3.4.1. PARAMETROS DE AVALIAÇÃO

Os parâmetros de rugosidade foram determinados a partir da avaliação da irregularidade da superfície, utilizando-se para isso os seguintes indicadores fornecidos pelo ensaio de perfilometria:

Sq	altura média elevada ao quadrado
Sa	média aritmética da altura
Sz	maior diferença entre picos e vales
Sp	maior pico
Sv	maior vale
Ssk	predominância de picos ou vales
Sku	irregularidade entre proporção de picos e vales

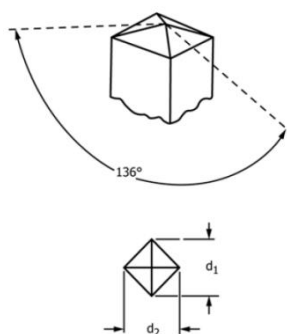
Esses valores foram tabelados e posteriormente plotados para melhor interpretação da evolução da deformação; tais valores também alimentam o software do equipamento para construir um modelo 3D da superfície das amostras.

3.5. ENSAIO DE MICRODUREZA VICKERS

O objetivo deste ensaio é a determinação de propriedades mecânicas dos revestimentos através da penetração de uma ponteira de diamante contra a superfície do revestimento.

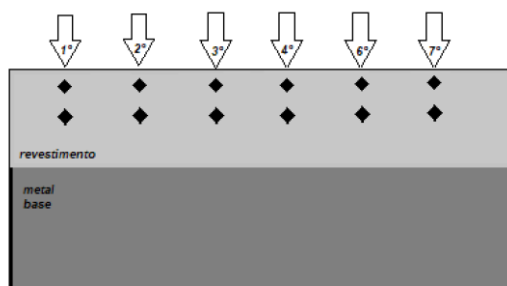
Neste trabalho, os ensaios foram conduzidos com auxílio do equipamento presente no Campus Ponta Grossa da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, da marca Shimadzu HMV-G20 *Series*, programado para leituras dentro da escala *Vickers* de microdureza, e seguindo as recomendações presentes na norma ASTM E384-11 (2011) - *Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials*.

Figura 12. Esquema da ponta de diamante em pirâmide do ensaio de microdureza Vickers



Fonte: Adaptado de ASTM E384-11 (2011).

Figura 13. Esquema de identações nos revestimentos



Fonte: Autoria Própria.

Para as leituras de microdureza, efetuamos dois pontos de medição próximos às superfícies dos revestimentos e repetimos o processo distribuindo as linhas de indentação uniformemente pela superfície da amostra aspergida. Dadas dimensões das amostras, foi possível realizar pelo menos 7 identações em cada revestimento, de acordo com o espaçamento mínimo entre identações, como sugerido pela norma técnica.

Cada teste de microdureza foi desenvolvido com o equipamento mencionado anteriormente configurado para representar 300gf (2,94N).

3.6. ENSAIO DE EROSIÃO COM JATO DE LAMA

O ensaio de erosão por jato de lama foi realizado no laboratório da universidade com o equipamento *DUCOM – Slurry Jet Erosion Tester* (configuração do modelo representado na **Figura 14**), tendo como base a norma “*ASTM-G37-10 – Standard Test Method for Liquid Impingement Erosion Using Rotating Apparatus*”, com modificações para ser utilizado o jato de lama.

O equipamento realizado no ensaio funciona realizando a propulsão de um jato de água em mistura com partículas sólidas que realizam a erosão. Essa propulsão é realizada pela pressurização de um reservatório com água, que é direcionada ao bocal de saída onde há a alimentação do material erodente. Na saída do bocal está localizada uma placa de suporte onde a amostra é fixada, essa mesa possui regulagem no ângulo de colisão do jato de lama com a amostra, função importante, pois foi realizado ensaios com dois ângulos. O equipamento conta com

um reservatório abaixo da placa de teste onde é depositado a água e o erodente expelido durante o ensaio. A areia era reutilizada, sendo recolhida do reservatório e abastecendo novamente o recipiente de pressão ao fim de cada teste. O funcionamento da máquina é mostrado no esquema da **Figura 14** junto com mais imagens do equipamento utilizado nesse ensaio

Figura 14. Equipamento para ensaio de Jato de lama.



Fonte: Autoria própria.

O equipamento conta com algumas regulagens de parâmetros, como o ângulo de impacto, velocidade do jato d'água, volume de saída do material erodente e tempo de ensaio definido pelo contador automático (DUCOM, 2019). O material erodente também é uma variável sendo a sua granulometria mais um parâmetro para os testes.

O *setup* nos ensaios foi repetido com os mesmos parâmetros de outros

ensaios realizados por outros acadêmicos, a fim de se manter um parâmetro igual e assim permitir uma comparação com resultados obtidos em outros estudos e com outros materiais. A configuração é descrita na tabela abaixo:

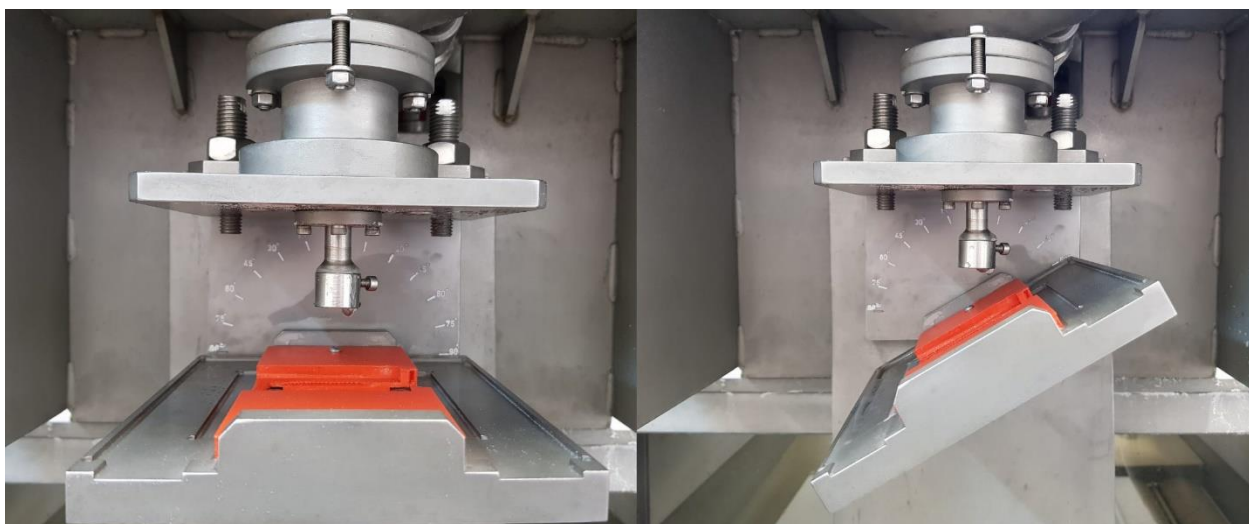
Tabela 4. Parâmetros de deposição *Jato de lama*

Parâmetro	Especificação
Equipamento	DUCOM - Slurry Jet Tester
Erodente	Areia
Tamanho do erodente	200 - 400 μm
Vazão de erodente	30rpm = 1788g/min
Diâmetro do bocal	4mm
Ângulos de impacto	60°, 90°
Velocidade do Jato	750rpm = 25,5m/s
Distância do jato	50mm
Tempos de ensaio acumulados	30, 60, 120, 240, 480s

Fonte: Autoria própria.

Tendo os parâmetros permanecidos iguais em todos os ensaios, apenas houve a variação do ângulo de impacto, a 90° e 60°, como mostra a **Figura 15**, abaixo.

Figura 15. Ensaios com ângulo de 90° e 60°



Fonte: Autoria própria.

3.7. A REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS

Os dois materiais estudados tiveram dois corpos de prova para cada etapa do ensaio, ou seja, 4 corpos de prova no total da amostra HVOF, identificadas como P5 (dois para ensaio a 90° e dois para 60°) assim como 4 corpos para a amostra de HVAF, identificadas como B5.

Cada ensaio teve efeito cumulativo, havendo intervalos entre cada teste para pesagem de cada amostra para se obter um coeficiente de perda de massa e análise superficial em cada etapa. No total cada amostra teve cinco etapas de ensaio, a primeira com 30s de duração, a segunda com 30s, a terceira 60s, a quarta com 120s e por fim a quinta com 240s, totalizando 480s (ou 8 minutos) de teste.

Entre cada etapa do teste houve a limpeza das amostras como descrito no item 3.2 e em seguida a aferição de massa para traçar no final as funções de perda de massa de cada revestimento.

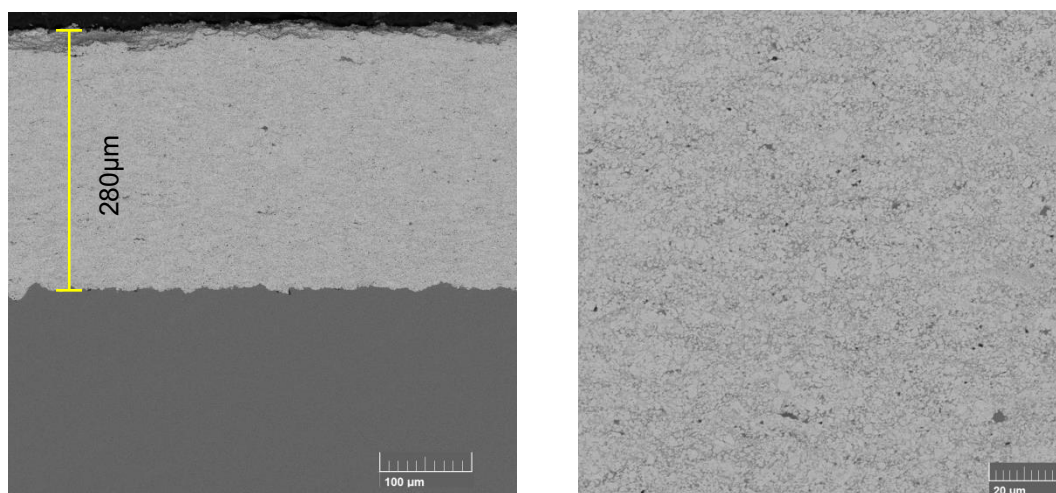
4. RESULTADOS

Após aferição da perda de massa em cada uma das etapas de ensaio às quais as amostras foram submetidas, analisamos graficamente a evolução do desempenho dos revestimentos e obtivemos as distribuições dispostas a seguir.

4.1. ANÁLISE METALOGRÁFICA

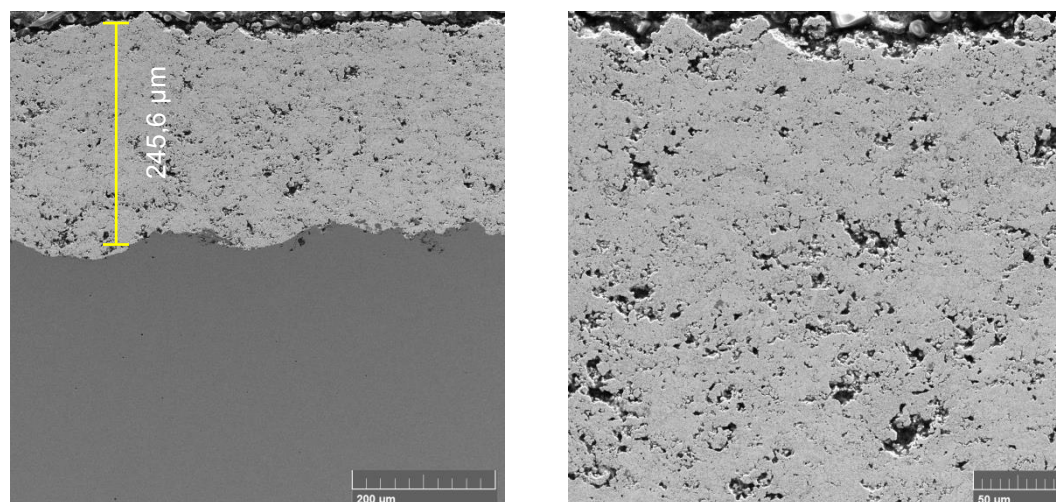
As **figuras gura 16** e **Figura 17** foram obtidas através de análise por Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) e são representações da microestrutura das amostras revestidas.

gura 16. Revestimento de WC-10Co4Cr , amostra de HVOF (B5).



Fonte: Autoria própria

Figura 17. Revestimento de WC-10Co4Cr, amostra HVOF (P5).



Fonte: Autoria própria.

A deposição pelo processo HVAF obteve espessura média de revestimento de 280 μ m, enquanto o processo HVOF conseguiu revestimentos de aproximadamente 245,68 μ m de espessura média. Embora não haja grande diferença entre as espessuras obtidas, é visualmente notável a diferença de compactação dos revestimentos.

Outra característica que merece destaque nas imagens acima, é a porosidade dos revestimentos. Nota-se como o processo de HVAF gerou menos poros na formação das lamelas da superfície, quando comparado ao resultado obtido com HVOF. Ao quantificar esta porosidade com auxílio de software para comparação das fases do revestimento (Modelo *AxioVision AxioVS40x64 V4.9.1.0*), obtemos os valores médios representados na **Tabela 5**.

Tabela 5. Porosidade média das amostras

	Porosidade média
HVOF	8.06%
HVAF	1,08%

Fonte: Autoria Própria

A diferença de porosidade entre as amostras chega próximo aos 87%, corroborando as informações já ditas por outros pesquisadores sobre a menor porosidade dos processos HVAF.

Mesmo com porosidade mais elevada no processo HVAF, ambas as amostras obtiveram revestimentos de qualidade considerável, sem a presença de trincas ou inclusões indesejáveis nas lamelas dos revestimentos.

4.2. RESULTADOS DOS TESTES DE MICRODUREZA

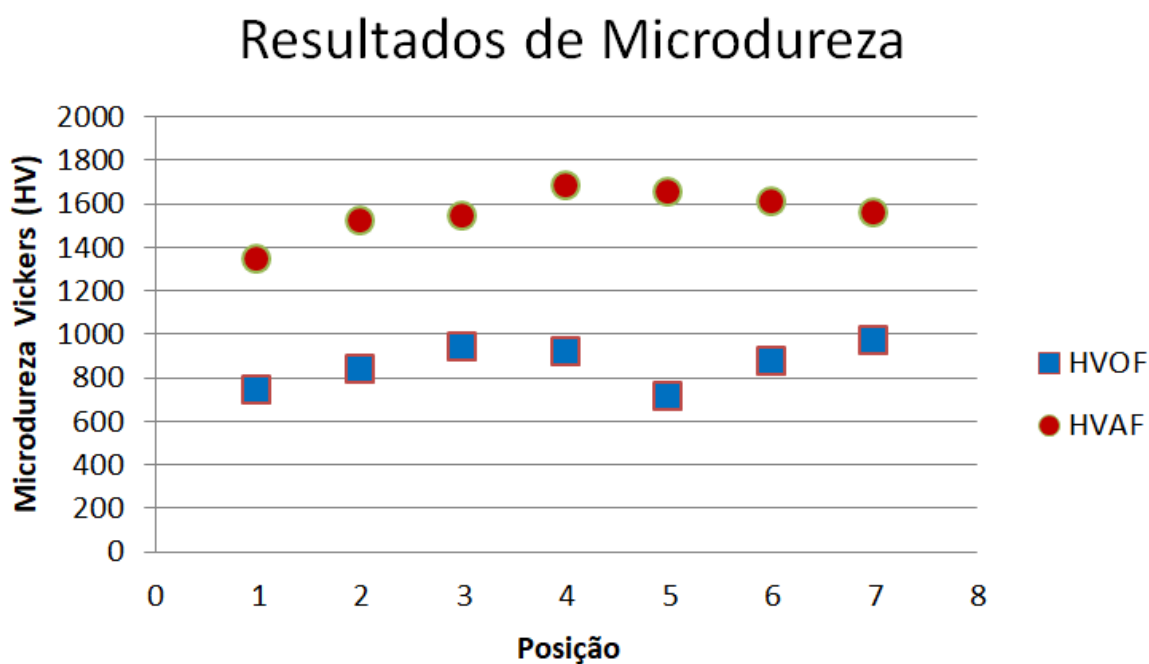
A **Tabela 6**, mostra dados de microdureza coletados nos testes realizados.

Tabela 6. Resultados de Microdureza

	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°
HVOF	738 HV	832 HV	939 HV	914 HV	710 HV	870 HV	970 HV
HVAF	1342 HV	1517 HV	1541 HV	1676 HV	1648 HV	1606 HV	1554 HV

Fonte: Autoria própria.

Figura 18. Resultados de Microdureza



Fonte: Autoria própria.

Percebe-se da **Figura 18. Resultados de Microdureza** que os valores obtidos de microdureza nas amostras de HVOF e HVOF podem ser considerados constantes ao longo do revestimento, e condizem com os valores médios encontrados na literatura.

Além disso, como afirmam outros pesquisadores, a microdureza obtida nas amostras de HVOF é consideravelmente maior que aquelas obtidas nas amostras de HVOF. Isso deve-se, em partes, à presença de porosidade mais elevada nas amostras de HVOF.

4.3. Amostra WC-10Co4Cr COM HVOF

4.3.1. JATO DE LAMA COM INCLINAÇÃO EM 60°

Os dados da tabela a seguir foram obtidos por aferição em balança de precisão do laboratório de materiais da UTFPR após ensaios de *Jato de lama* realizados na amostra B5 em angulação de 60°.

Tabela 7. Perda de massa, amostra de HVOF em 60°.

Tempo Acumulado (min)	0	0.5	1	2	4	8
Massa 1	59.6849	59.6841	59.6824	59.6820	59.6801	59.6771
Massa 2	59.6850	59.6840	59.6824	59.6820	59.6802	59.6770
Massa 3	59.6849	59.6843	59.6826	59.6820	59.6801	59.6771
Media	59.6849	59.6841	59.6825	59.6820	59.6801	59.6771
Perda de massa acumulada (mg)	0	0.80	2.47	2.9	4.8	7.9
Taxa de perda de massa 1º ensaio [mg/min]	0	1.6	1.6667	0.2333	0.4667	0.3833

A seguir, apresentam-se os dados obtidos por aferição do equipamento de perfilometria após cada uma das etapas do ensaio de *Jato de lama* para a amostra HVOF em angulação de 60°.

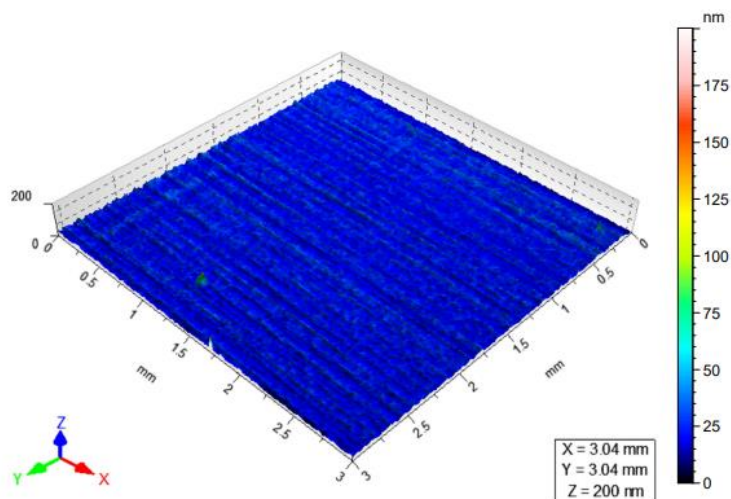
Tabela 8. Parâmetros de superfície, amostra HVOF em 60°.

	0	30	60	120	240	480	
Sq	14.1	0.168	0.272	0.39	0.436	0.666	nm
Ssk	0.59	-1.27	-0.789	-0.403	-0.244	-0.175	
Sku	3.98	7.86	4.19	3.13	3.2	3.15	
Sp	173	0.782	1.02	1.27	1.48	2.15	Nm
Sv	27.1	0.898	1.13	1.45	1.61	2.26	Nm
Sz	200	1.68	2.15	2.73	3.09	4.41	Nm
Sa	11.3	0.108	0.21	0.314	0.344	0.526	

Fonte: Autoria própria.

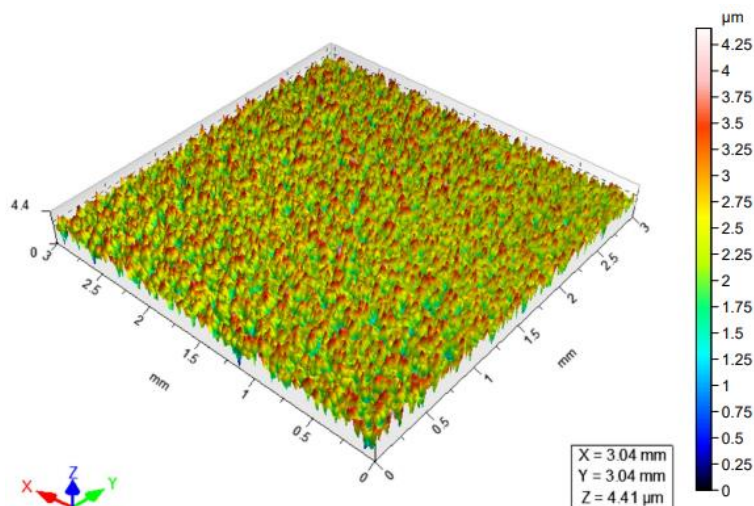
As figuras **Figura 19** e **Figura 20** mostram a evolução da rugosidade na superfície da amostra HVOF, em 60°. Percebe-se que, a rugosidade não apresentou oscilações discrepantes entre os diferentes ângulos avaliados, sugerindo esta não ter sofrido impacto além da rugosidade uniforme já esperada com a variação dos parâmetros em estudo.

Figura 19. Perfil da superfície da amostra HVOF em inclinação de 60° antes dos ensaios (t=0s)



Fonte: Autoria própria.

Figura 20. Perfil da superfície da amostra HVOF em inclinação de 60° após os ensaios (t=480s)



Fonte: Autoria própria.

4.3.2. JATO DE LAMA COM INCLINAÇÃO EM 90°

Os dados da tabela a seguir foram obtidos por aferição em balança de precisão do laboratório de materiais da UTFPR após ensaios de *Jato de lama* realizados na amostra HVOF em angulação de 90°.

Tabela 9. Perda de massa, amostra HVOF em 90°.

Tempo Acumulado (min)	0	0.5	1	2	4	8
Massa 1	24.3099	24.3095	24.3091	24.3071	24.3048	24.3000
Massa 2	24.3101	24.3097	24.3092	24.3072	24.3047	24.3001
Massa 3	24.3100	24.3096	24.3092	24.3072	24.3048	24.3001
Media	24.3100	24.3096	24.3092	24.3072	24.3048	24.3001
Perda de massa por ensaio (mg)	0	0.400	0.433	2.000	2.400	4.700
Perda de massa acumulada (mg)	0	0.40	0.83	2.8	5.2	9.9
Taxa de perda de massa 1º ensaio [mg/min]	0	0.8	0.4333	1	0.6	0.5875

Fonte: Autoria própria.

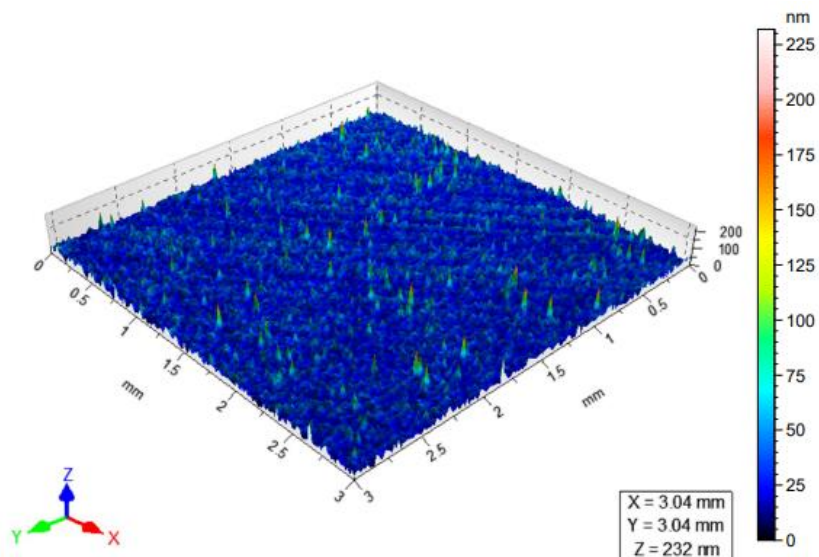
Tabela 10. Parâmetros de superfície, amostra HVOF em 90°.

	0	30	60	120	240	480	
Sq	16.8	0.265	0.377	0.724	0.718	0.763	nm
Ssk	0.0106	-0.969	-0.502	0.116	-0.019	-0.152	
Sku	3.36	5.34	4.17	22.2	7.67	5.21	
Sp	92.1	1.16	2.05	7.03	5.12	4.59	nm
Sv	56.5	1.33	1.76	6.69	4.8	4.59	nm
Sz	149	2.49	3.81	13.7	9.92	9.18	nm
Sa	13.2	0.197	0.296	0.465	0.531	0.581	

Fonte: Autoria própria.

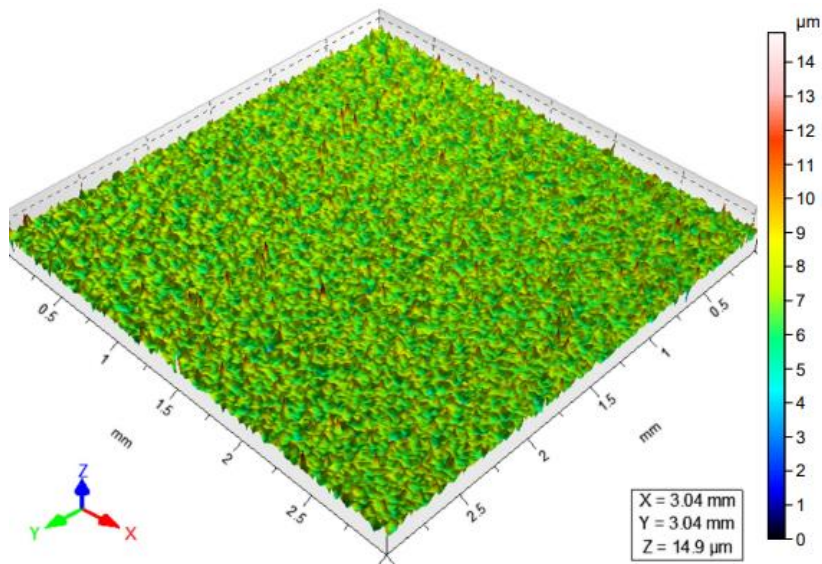
As figuras abaixo mostram a evolução da rugosidade na superfície da amostra HVOF em 90°. Percebe-se que, a rugosidade não apresentou oscilações discrepantes entre os ângulos avaliados, sugerindo esta, assim como sua amostra correlata em 60°, não ter sofrido impacto além do esperado com a variação dos parâmetros em estudo.

Figura 21. Perfil da superfície da amostra HVAF em inclinação de 90° antes dos ensaios (t=0s)



Fonte: Autoria própria.

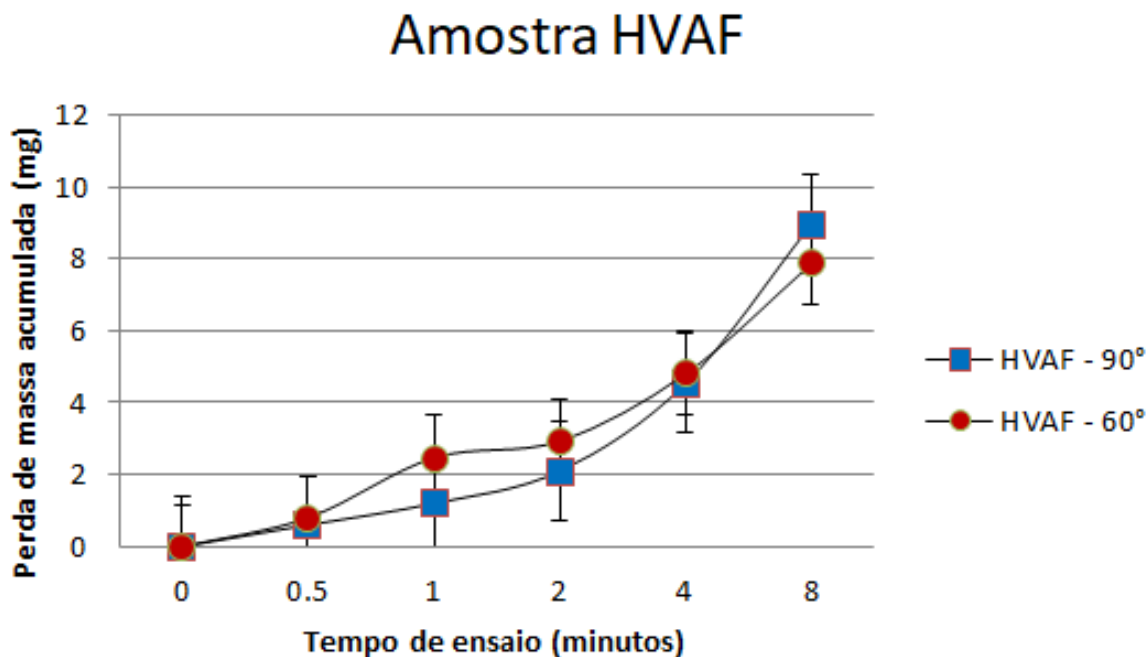
Figura 22. Perfil da superfície da amostra HVAF em inclinação de 90° após os ensaios (t=480s)



Fonte: Autoria própria.

Obtém-se então, o seguinte gráfico comparativo do acúmulo das perdas de massa entre as amostras HVAF.

Figura 23. Perda de massa acumulada, amostra HVOF.



Fonte: Autoria própria.

Observa-se através do exposto na **Figura 23**, que as taxas de erosão não apresentam diferenças significativas para caracterizar melhor ou pior desempenho em relação à variação do ângulo de *Jato de lama*. Isso pode ser explicado pela presença de características dúcteis mesmo em um material de alta dureza, como a liga com carbonetos de Tungstênio em análise. De acordo com a literatura, a variação dos ângulos de ataque de erosão poderá causar diferentes impactos quando em materiais com baixa ductilidade ou baixa dureza.

4.4. Amostra WC-10Co4Cr COM HVOF

4.4.1. JATO DE LAMA COM INCLINAÇÃO EM 60°

Os dados de a tabela a seguir foram obtidos por aferição em balança de precisão do laboratório de materiais da UTFPR após ensaios de *Jato de lama* realizados na amostra HVOF em angulação de 60°

Tabela 11. Perda de massa, amostra HVOF em 60°.

Tempo Acumulado (min)	0	0.5	1	2	4	8
Massa 1	36.2220	36.2215	36.2196	36.0896	35.9596	35.8296
Massa 2	36.2219	36.2216	36.2197	36.0897	35.9597	35.8297
Massa 3	36.2221	36.2218	36.2198	36.0898	35.9598	35.8298
Media	36.2220	36.2216	36.2197	36.0897	35.9597	35.8297
Perda de massa por ensaio (mg)	0	0.367	1.933	130.000	130.000	130.000
Perda de massa acumulada (mg)	0	0.37	2.30	132.3	262.3	392.3
Taxa de perda de massa 1° ensaio [mg/min]	0	0.7333	1.9333	65	32.5	16.25

Fonte: Autoria própria.

A seguir, apresentam-se os dados obtidos por aferição do equipamento de perfilometria após cada uma das etapas do ensaio de *Jato de lama* para a amostra HVOF em angulação de 60°.

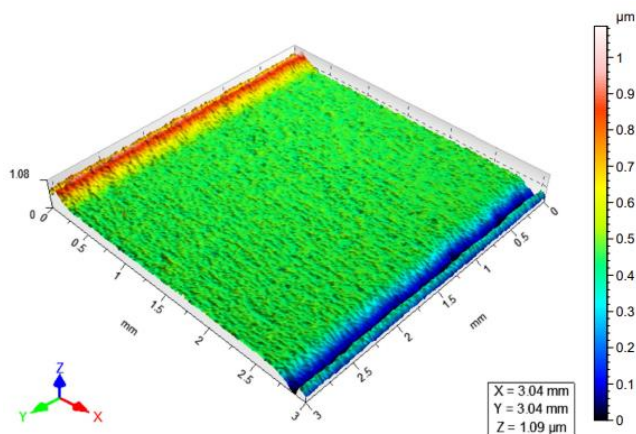
Tabela 12. Parâmetros de superfície, amostra HVOF em 60°.

	0	30	60	120	240	480	
Sq	22	0.524	0.638	1.34	1.7	1.95	nm
Ssk	0.179	-1.44	-1.13	-1.28	-0.712	-0.59	
Sku	3.7	6.3	5.25	5.6	3.75	3.39	
Sp	128	1.26	1.42	3.78	4.88	5.04	nm
Sv	67.8	3.04	3.43	6.92	8.58	11.12	nm
Sz	196	4.3	4.85	6.92	8.58	11.12	nm
Sa	17.2	0.395	0.49	0.66	0.73	0.78	

Fonte: Autoria própria.

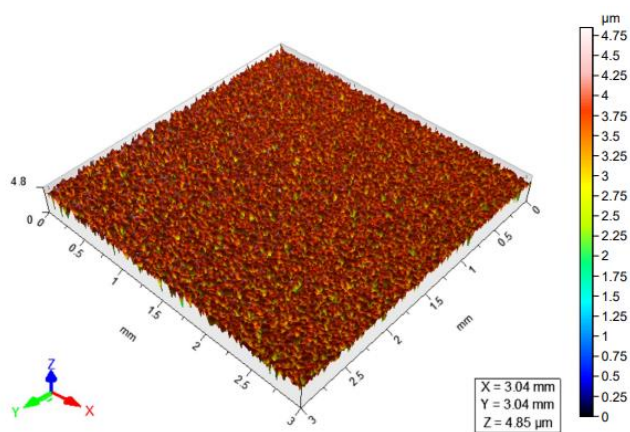
As figuras abaixo mostram a evolução da rugosidade na superfície da amostra HVOF em 60°. Percebe-se que, a rugosidade, também neste processo, não apresentou oscilações discrepantes entre os ângulos em estudo, sugerindo esta não ter sofrido impacto além do esperado com a variação dos parâmetros em estudo.

Figura 24. Perfil da superfície da amostra HVOF em inclinação de 60° antes dos ensaios (t=0s)



Fonte: Autoria própria.

Figura 25. Perfil da superfície da amostra HVOF em inclinação de 60° após os ensaios (t=480s)



Fonte: Autoria própria.

4.4.2. JATO DE LAMA COM INCLINAÇÃO EM 90°

Os dados da tabela a seguir foram obtidos por aferição em balança de precisão do laboratório de materiais da UTFPR após ensaios de *Jato de lama* realizados na amostra HVOF em angulação de 90°

Tabela 13. Perda de massa, amostra HVOF em 90°.

Tempo Acumulado (min)	0	0.5	1	2	4	8
Massa 1	21.0647	21.0631	21.0622	21.0604	21.0584	21.0520
Massa 2	21.0649	21.0631	21.0622	21.0603	21.0582	21.0521
Massa 3	21.0649	21.0631	21.0622	21.0606	21.0585	21.0520
Media	21.0648	21.0631	21.0622	21.0604	21.0584	21.0520
Perda de massa por ensaio (mg)	0	1.733	0.900	1.767	2.067	6.333
Perda de massa acumulada (mg)	0	1.73	2.63	4.4	6.5	12.8
Taxa de perda de massa 1º ensaio [mg/min]	0	3.4667	0.9	0.8833	0.5167	0.7916

Fonte: Autoria própria.

A seguir, apresentam-se os dados obtidos por aferição do equipamento de perfilometria após cada uma das etapas do ensaio de *Jato de lama* para a amostra HVOF em angulação de 90°.

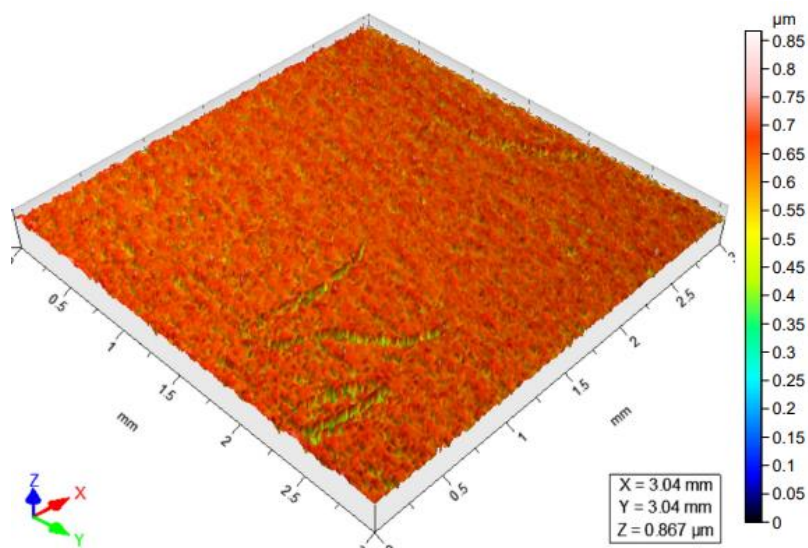
Tabela 14. Parâmetros de superfície, amostra HVOF em 90.

	0	30	60	120	240	480	
Sq	20.8	0.952	1.06	1.34	1.7	1.95	nm
Ssk	-0.28	-2.21	-1.82	-1.28	-0.712	-0.59	
Sku	3.91	10.2	7.9	5.6	3.75	3.39	
Sp	83.8	2.8	2.07	3.78	4.88	5.04	nm
Sv	92.2	6.4	6.4	7.08	7.13	7.12	nm
Sz	176	9.2	8.47	10.9	12	12.2	nm
Sa	16	0.678	0.781	1.02	1.33	1.54	

Fonte: Autoria própria.

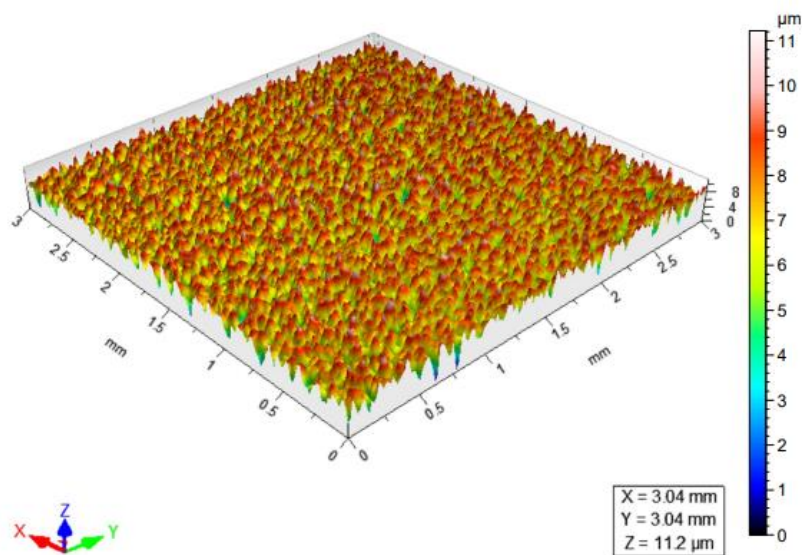
As figuras abaixo mostram a evolução da rugosidade na superfície da amostra HVOF em 90°. Percebe-se mais uma vez, que a rugosidade não apresentou oscilações discrepantes entre os processos, sugerindo esta também não ter sofrido impacto além do esperado com a variação dos parâmetros em estudo.

Figura 26. Perfil da superfície da amostra HVOF em inclinação de 90° antes dos ensaios (t=0s).



Fonte: Autoria própria.

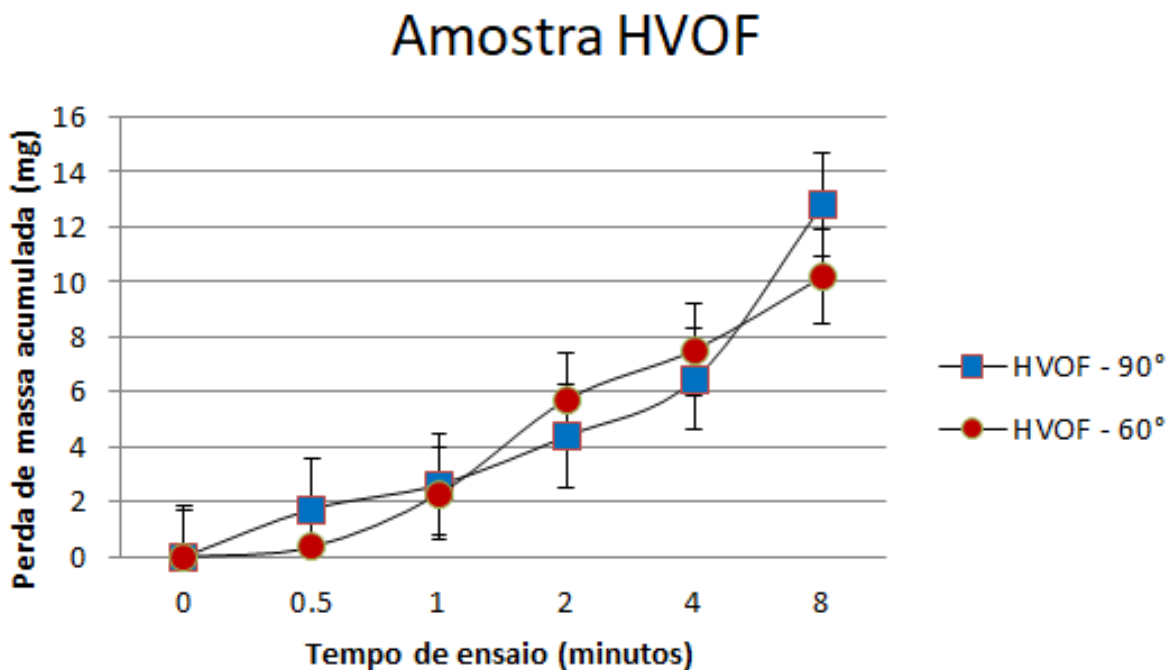
Figura 27. Perfil da superfície da amostra HVOF em inclinação de 90° após os ensaios (t=480s)



Fonte: Autoria própria.

Obtém-se então, o seguinte gráfico comparativo do acúmulo das perdas de massa entre as amostras HVOF.

Figura 28. Perda de massa acumulada, amostra HVOF.

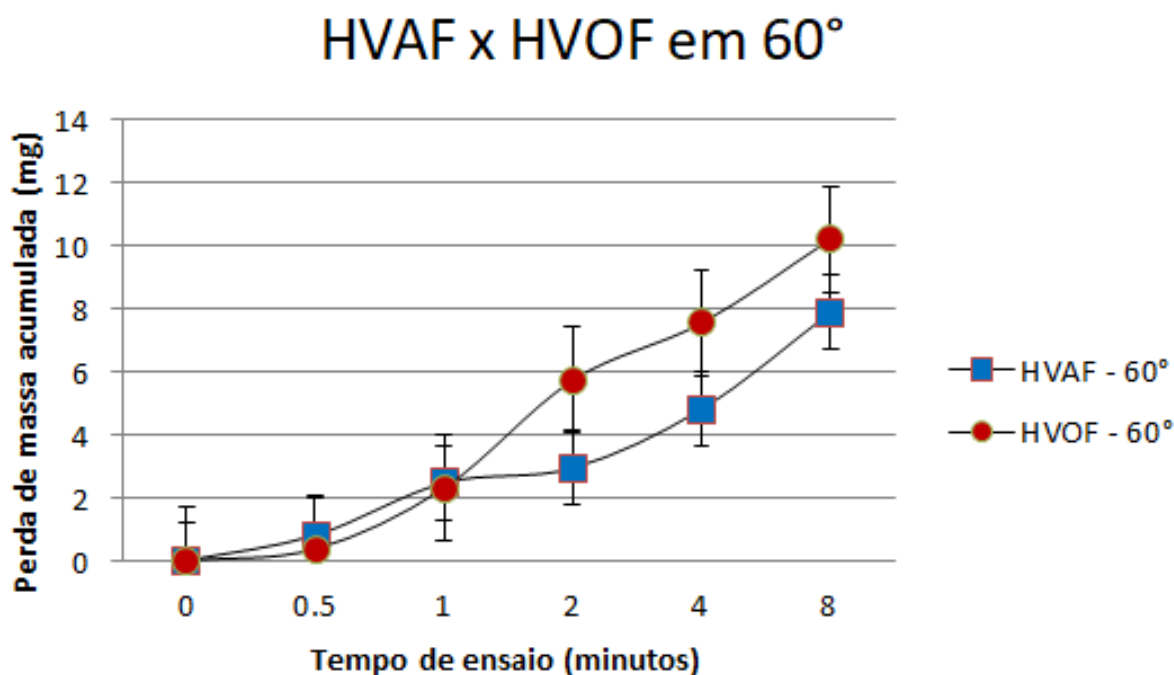


Fonte: Autoria própria.

Os dados presentes na **Figura 28**, expõe que as taxas de erosão não apresentam diferenças significativas para caracterizar melhor ou pior desempenho em relação à variação do ângulo de *Jato de lama*. Novamente podemos extrair dos dados acima expostos conclusões semelhantes àquelas obtidas com as amostras de HVOF, pois se tratando do mesmo material analisado, não houve influência significativa na resistência à erosão sob diferentes ângulos de ataque.

Por outro lado, reunindo os dados de ambos os processos, é possível uma leitura comparativa do desempenho das amostras em ensaio, como visto nos gráficos a seguir:

Figura 29. Perda de massa acumulada entre as amostras HVAF e HVOF em ângulo de ensaio de 60°



Fonte: Autoria própria.

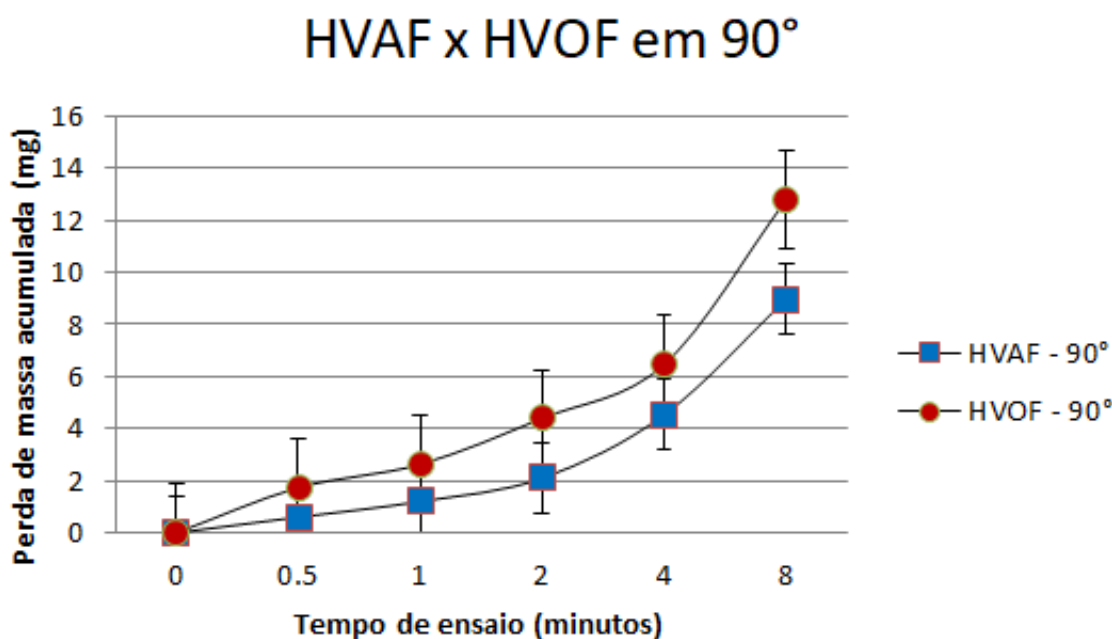
Nota-se pela **Figura 29**, que em erosão *Jato de lama* em 60° a amostra HVOF apresentou maiores taxas de erosão.

Estes valores podem ser explicados pelos resultados de porosidade e microdureza, apresentados na **Tabela 5** e na **Tabela 6**, respectivamente.

Como o revestimento de HVOF apresentou valores menores de microdureza ao passo que apresentou valores maiores de porosidade, sua resistência à erosão foi conseqüentemente menor que sua concorrente de HVAF.

Este resultado está, novamente, à par daqueles encontrados em literatura, uma vez que o processo de aspersão com equipamento HVOF apresenta menores temperaturas de deposição. Característica que não contribui para a qualidade do processo tão bem quanto às altas temperaturas do HVAF, especialmente em ligas com presença de carbonetos de Tungstênio.

Figura 30. Perda de massa acumulada entre as amostras HVOF e HVOF em ângulo de ensaio de 90°



Fonte: Autoria própria.

De modo semelhante, percebe-se da **Figura 30** que, em erosão em 90°, a amostra HVOF novamente apresentou taxa de erosão mais elevada em comparação a HVOF.

Estes valores também podem ser explicados pelos resultados de porosidade e microdureza, apresentados na **Tabela 5** e na **Tabela 6**, respectivamente.

Além disso, como já evidenciado pelos ensaios de perfilometria, a variação nos ângulos de ataque dos ensaios de *Jato de lama* nos leva a concluir que, para os ângulos analisados, não houve participação de significância das variáveis consideradas para o processo de erosão.

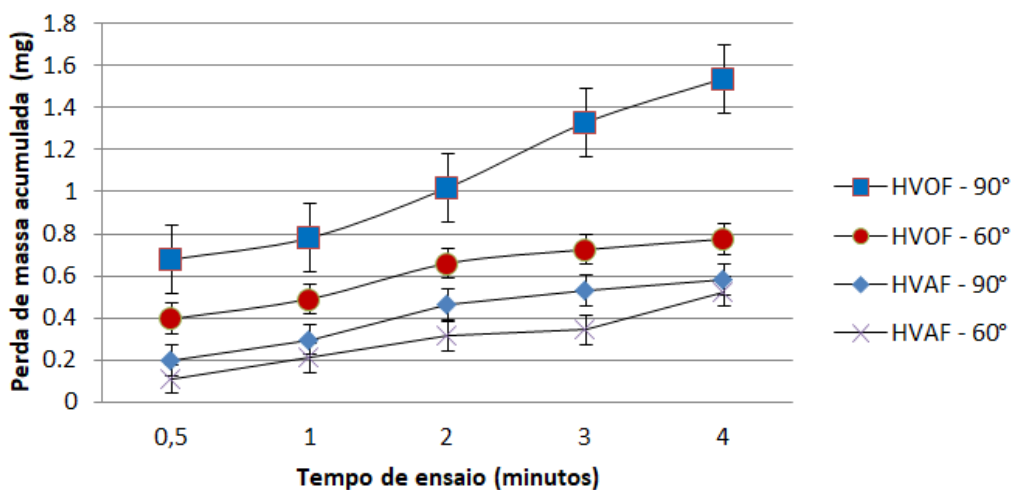
Esse fato fica ainda mais claro quando partimos para a análise gráfica dos parâmetros de rugosidade da superfície, como mostram as **Figuras Figura 31** e **Figura 32**. Nessa análise, verificamos como o aumento da rugosidade superficial dos revestimentos é quase que constante e linear, reforçando a baixa influência do ângulo de ataque nas superfícies consideradas.

Por fim, a análise é completa quando consideramos o exposto na **Figura 32**, onde se evidencia o aumento dos valores para as amostras erodidas com sua superfície normal à erosão (90°), enquanto as amostras em 60° apresentaram

menores diferenças entre picos e vales, o que pode ser explicado pelo aumento na área de erosão quando o *Jato de lama* ocorre em 60°, em comparação à área submetida à erosão das amostras em 90°.

Figura 31. Parâmetro "Sa" de superfície

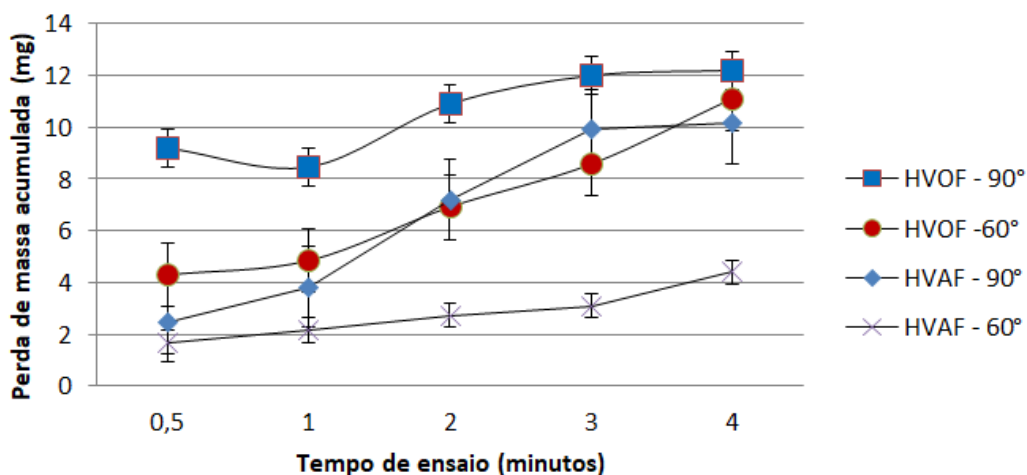
Média aritmética da altura dos picos das superfícies (Sa)



Fonte: Autoria própria.

Figura 32. Parâmetro "Sz" de superfície.

Maior diferença entre picos e vales das superfícies (Sz)



Fonte: Autoria própria.

5. CONCLUSÃO

Após análise dos resultados deste trabalho, podemos concluir:

1. Os revestimentos WC-10Co4Cr obtiveram melhor resistência à erosão quando aspergidos pelo processo de HVAF
2. A menor porosidade inerente ao processo HVAF quando operado com ligas de WC, foi influente para determinação da microdureza dos revestimentos, que por sua vez impactou a resistência à erosão, menor para o processo de HVOF.
3. Os revestimentos não apresentaram variação significativa na resistência à erosão com diferentes ângulos de impacto das partículas.
4. A rugosidade superficial do material permaneceu relativamente constantes mesmo com a variação dos ângulos de erosão.
5. Em ângulos de 60° de erosão houve maior diferença entre picos e vales dos revestimento, sugerindo este parâmetro estar vinculado ao fato de que, em 60°, a área de impacto do processo de erosão é maior.

Sugere-se, para trabalhos futuros, investigar o comportamento dos revestimentos de WC-10Co4Cr depositados com HVAF e HVOF sob erosão em ângulos próximos a 30°, explorando ainda mais a tenacidade dos revestimentos contendo carboneto de tungstênio sob essas condições de ensaio.

6. REFERÊNCIAS

1. ASKELAND, D. R. **The Science and Engineering of Materials**. 6th. ed. Stamford, CT: Global Engineering, 2011.
2. BOSE, S. **High Temperature Coatings**. Tokyo: Elsevier, 2007.
3. CHUNG, D. D. L. **Carbon Fiber Composites**. Newton, MA: Butterworth-Heinemann, 1994.
4. DAVIS, J. R. **Handbook of thermal technology**. 1st. ed. Ohio: ASM International., 2004.
5. FAUCHAIS, P. L.; HEBERLEIN, J. V. R.; BOULOS, M. I. **Thermal Spray Fundamentals**. 1st. ed. New York: Springer, 2014.
6. FINNIE, I. Erosion of Surfaces by Solid Particle. **Wear**, Emeryville, CA, 1960. 87-103.
7. GOYAL, D. K. et al. Slurry erosion behaviour of HVOF sprayed WC–10Co–4Cr and Al₂O₃/13TiO₂ coatings on a turbine steel. **Wear**, Punjab, India, v. 289, n. 289, p. 46-57, set. 2012.
8. GUO, et al. **Novel Lanthanum**. 1. ed. Cham, Switzerland: Springer, v. 1, 2021.
9. HÖGANÄS. **Materials Data Sheet -PD-4033- Amperit 557**. Höganäs. [S.l.]. 2020.
10. HUTCHINGS, I.; SHIPWAY, P. **Tribology: Friction and wear of engineering materials**. 2nd. ed. Cambridge, MA: Matthew Deans, 2017.
11. JANKA, L. et al. Improving the high temperature abrasion resistance of thermally sprayed Cr₃C₂-NiCr coatings by WC addition. **Surface & Coatings Technology**, n. 337, p. 296-305, 2018. ISSN <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.01.035>.
12. JI, G.-C. et al. Microstructural characterization and abrasive wear performance of HVOF sprayed Cr₃C₂-NiCr coating. **Surface & Coatings Technology**, 2006. 6749-6757.
13. KUMAR, V.; KANDASUBRAMANIAN*, B. Processing and design methodologies for advanced and novel thermal. **Particuology**, Girinagar, Pune 411025, India, v. 27, p. 1-28, May 2016. ISSN <https://doi.org/10.1016/j.partic.2016.01.007>.
14. LIMA, C. C.; TREVISAN, R. **ASPERSÃO TÉRMICA: FUNDAMENTOS E APLICAÇÕES**. 2nd. ed. [S.l.]: [s.n.], 2007. 152 p. ISBN ISBN 9788588098374.
15. LIU, X. **A study on the erosion and erosion-oxidation of metal matrix composites**. 1st. ed. Helsinki: Otamedia Oy, 2003.
16. MATIKAINEN, V. et al. Erosion wear performance of WC-10Co4Cr and Cr₃C₂-25NiCr coatings. **Surface & Coatings Technology**, 25 July 2019. 196-212.
17. MATIKAINEN, V. et al. Erosion wear performance of WC-10Co4Cr and Cr₃C₂-25NiCr coatings sprayed with high-velocity thermal spray processes. **Surface & Coatings Technology**, 2019. 196-212.

18. METCO, O. **Material Product Data Sheet - DSM-0240.1 – Woka 7200 CrC-NiCr Series**. Oerlikon Metco. [S.l.]. 2021.
19. MURAKAMI, H.; YANO, T.; SODEOKA, S. Process dependence of Ir-based bond coatings. **Materials Transactions**, v. 45, n. 9, p. 2886–2890, 2004.
20. OJALA, N. et al. Wear performance of quenched wear resistant steels in abrasive slurry erosion. **Wear**, Tampere, 02 19 2016. 354-355.
21. RIBAS, M. T. **INFLUÊNCIA DA RAZÃO PROPANO-OXIGÊNIO E DO FLUXO TOTAL**. UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ. Ponta Grossa, p. 145. 2019.
22. SILVEIRA, L. L. **Resistência à corrosão e cavitação de revestimentos FeMnCrSi**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, p. 120. 2018.
23. STACHOWIAK, G. W. **ENGINEERING TRIBOLOGY**. 4th. ed. Perth, Australia: Butterworth-Heinemann, 2014.
24. SUNDARARAJAN, G.; SHEMON, P. G. A NEW MODEL FOR THE EROSION OF METALS AT NORMAL INCIDENCE. **Wear**, Columbus, OH, 1983. 237-258.
25. VASSEN, R. . E. A. Zirconates as new materials for thermal barrier coatings. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 83, p. 2023–2028, 2000.