

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

MARIO HENRIQUE ZEM

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DO REVESTIMENTO À BASE DE CARBONETO DE
CROMO, Cr_3C_2 25(Ni 20Cr), DEPOSITADO COM DIFERENTES PARÂMETROS
DE DEPOSIÇÃO DO PROCESSO HVOF ETANOL**

PONTA GROSSA

2026

MARIO HENRIQUE ZEM

ANÁLISE DO DESEMPENHO DO REVESTIMENTO À BASE DE CARBONETO DE CROMO, Cr_3C_2 25(Ni 20Cr), DEPOSITADO COM DIFERENTES PARÂMETROS DE DEPOSIÇÃO DO PROCESSO HVOF ETANOL

Performance analysis of chromium carbide-based coating Cr_3C_2 25(Ni20Cr) deposited using different HVOF-ethanol process parameters

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

Orientador: Anderson Geraldo Marenda Pukasiewicz.

Coorientador: Edson Cezar Grzebielucka

PONTA GROSSA

2026



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

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

MARIO HENRIQUE ZEM

ANÁLISE DO DESEMPENHO DO REVESTIMENTO À BASE DE CARBONETO DE CROMO, Cr_3C_2 25(Ni 20Cr), DEPOSITADO COM DIFERENTES PARÂMETROS DE DEPOSIÇÃO DO PROCESSO HVOF ETANOL

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

Data de aprovação: 01 de Julho de 2026

Prof. Anderson Geraldo Marena Pukasiewicz
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Luciano Augusto Lourençato
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Roger Navarro Verastegui
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

PONTA GROSSA

2026

Dedico este trabalho à Deus e à minha família, pelo apoio incondicional, amor e paciência ao longo de toda minha trajetória acadêmica. Sem vocês, nada disso faria sentido.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, aos meus pais e familiares, pelo amor, apoio e incentivo incondicional em todos os momentos da minha vida. Cada conquista minha é reflexo da base sólida que vocês me proporcionaram. Obrigado por acreditarem em mim, mesmo quando as dificuldades pareciam maiores do que as forças disponíveis.

Ao meu orientador, Anderson Geraldo Marena Pukasiewicz, agradeço pela dedicação, paciência e disponibilidade ao longo de todo o desenvolvimento deste trabalho. Sua orientação foi essencial para minha evolução acadêmica e profissional, e seu exemplo de compromisso com a pesquisa me inspirou em cada etapa do projeto.

Aos meus colegas e amigos de curso, agradeço pela parceria, pelas trocas de conhecimento, pelas conversas nos corredores e pelas horas de estudo compartilhadas. O caminho foi mais leve e motivador com a companhia e o apoio de vocês.

Agradeço também à UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná campus Ponta Grossa, por proporcionar uma formação sólida e por todo o suporte ao longo da minha jornada acadêmica. Estendo também meus sinceros agradecimentos ao Laboratório C²MMA presente na instituição, pelo apoio técnico, pela estrutura disponibilizada e pelas contribuições durante a realização do trabalho.

Por fim, deixo meu sincero agradecimento ao LACTEC (Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento), pela parceria e apoio durante a realização deste trabalho. A colaboração fornecida foi essencial para a aplicação prática do projeto e para a obtenção de resultados mais consistentes e relevantes.

RESUMO

O desgaste erosivo é um dos principais mecanismos de falha em componentes submetidos a ambientes severos, impactando diretamente a vida útil e os custos de manutenção em diversos setores da indústria. Como solução para mitigar esse problema, o presente trabalho estudou o comportamento do revestimento à base de carboneto de cromo Cr_3C_2 25(Ni20Cr) depositado pelo processo de aspersão térmica HVOF sobre um substrato de aço SAE 1020. A metodologia consistiu na variação dos parâmetros de deposição para obtenção de três condições distintas para análise, sendo que para cada um deles foi realizado a caracterização quanto à espessura, microdureza e porosidade. Posteriormente, as amostras foram submetidas a ensaios de erosão por jato de lama para ângulos de incidência de 30° e 60°. Obteve-se como resultado que todos os parâmetros alcançaram um revestimento com microdureza superior a 1200 HV. Também foram obtidos resultados em relação à análise de porosidade do revestimento aspergido, na qual a amostra depositada pelo parâmetro 1 de deposição alcançou resultado inferior a 2%, enquanto as amostras referentes aos demais conjuntos de deposição atingiram porosidade superior a 2%. Para os ensaios de erosão com ângulo de 30°, os parâmetros 1 e 3, referentes ao revestimento, destacaram-se por obter os menores valores de desgaste. No entanto para o ângulo de 60°, o parâmetro 3 apresentou um desempenho consideravelmente superior. Por meio dos resultados obtidos, supõem-se que a seleção dos parâmetros de deposição, influenciam diretamente a performance do revestimento frente ao ambiente a que ele estará sujeito. Também observou-se que a porosidade residual atua como limitante para ângulos mais baixos como o de 30°, tornando o parâmetro 1 o mais eficiente para condições onde prevalece a erosão por cisalhamento. Por outro lado, para o ângulo de incidência de 60°, que é mais severo para matérias *cermets*, o parâmetro 3 destacou-se como solução para mitigar o fenômeno de erosão severa.

Palavras chave: HVOF; Carboeto de cromo; Desgaste erosivo

ABSTRACT

Erosive wear is a primary failure mechanism for components operating in harsh environments, directly impacting service life and maintenance costs across various industrial sectors. To mitigate this issue, this study investigated the behavior of a Cr_3C_2 25(Ni20Cr) chromium carbide-based coating deposited via the HVOF thermal spray process onto an SAE 1020 steel substrate. The methodology involved varying deposition parameters to produce three distinct conditions for analysis, with each condition characterized in terms of thickness, microhardness, and porosity. Subsequently, the samples underwent slurry erosion testing at impingement angles of 30° and 60° . Results showed that all parameter sets yielded coatings with microhardness values exceeding 1200 HV. Porosity analysis revealed that the sample produced using deposition parameter 1 achieved a porosity of less than 2%, whereas samples from the other deposition sets exceeded 2%. In erosion tests at a 30° angle, coatings produced with parameters 1 and 3 exhibited the lowest wear rates; however, at a 60° angle, parameter 3 demonstrated considerably superior performance. These results suggest that the selection of deposition parameters directly influences coating performance in the intended operating environment. It was also observed that residual porosity acts as a limiting factor at lower angles (such as 30°), making parameter 1 the most efficient choice for conditions where shear-dominated erosion prevails. On the other hand, for the 60° angle of incidence (which is more severe for cermet materials) parameter 3 stood out as a solution to mitigate the phenomenon of severe erosion.

Keywords: HVOF. Chromium carbide. Erosive wear.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mecanismos de erosão por impacto de partículas sólidas.	15
Figura 2 - Influência da velocidade de impacto na taxa de erosão para materiais dúcteis e frágeis.	17
Figura 3 - Influência do ângulo de incidência das partículas no comportamento erosivo.	18
Figura 4 - Equipamento de ensaio erosivo da empresa DUCOM.	19
Figura 5 - Classificação dos principais processos de aspersão térmica de acordo com seu processo gerador de energia.	21
Figura 6 - Desenho esquemático da tocha para combustível etanol.	22
Figura 7 - Esquema da formação de camadas de revestimento por aspersão térmica.	23
Figura 8 - Microestrutura depositada por HVOF.	24
Figura 9 - Microestrutura do revestimento Cr_3C_2 25NiCr aspergido por HVOF.	25
Figura 10 - Sequência de atividades realizadas.	26
Figura 11 - Morfologia do pó via MEV: (a) ampliação 500x; (b) ampliação 3000x.	27
Figura 12 - Esquema da trajetória de varredura durante um passe de deposição.	30
Figura 13 - Amostras cortadas para ensaio erosivo.	31
Figura 14 - Esquema de medições de microdureza.	34
Figura 15 - Sistema de angulação do equipamento.	35
Figura 16 - Análise da espessura do revestimento; (a) amostra P1; (b) amostra P2; (c) amostra P3.	38
Figura 17 - Análise da porosidade com aumento de 200x; (a) amostra P1; (b) amostra P2; (c) amostra P3.	39
Figura 18 - Perda volumétrica do revestimento em relação ao tempo para ângulo de 30°.	41
Figura 19 - Superfícies desgastadas para ângulo de 30°; (a) Parâmetro 1, (b) Parâmetro 2; (c) Parâmetro 3	42
Figura 20 - Perda volumétrica do revestimento em relação ao tempo para ângulo de 60°.	42
Figura 21 - Superfícies desgastadas para ângulo de 60°; (a) Parâmetro 1; (b) Parâmetro 2; (c) Parâmetro 3	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química nominal do pó Cr_3C_2 25(Ni20Cr).	27
Tabela 2 - Parâmetros do processo de jateamento.....	28
Tabela 3 - Parâmetros de deposição.	29
Tabela 4 - Parâmetros do ensaio de desgaste por jato de lama.	35
Tabela 5 - Resultados da análise de espessura do revestimento.....	38
Tabela 6 - Resultados da análise de porosidade e densidade do revestimento.	39
Tabela 7 - Resultados da análise de microdureza do revestimento.	40
Tabela 8 - Taxa de desgaste erosivo por jato de lama para ângulo de 30°.	41
Tabela 9 - Taxa de desgaste erosivo por jato de lama para ângulo de 60°.	43

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
1.1	Objetivos	12
1.1.1	Objetivo geral.....	12
1.1.2	Objetivos específicos.....	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
2.1	Mecanismos de Desgaste Erosivo	13
2.2	Fatores Relevantes no Desgaste Erosivo	16
2.2.1	Velocidade de Impacto	16
2.2.2	Ângulo de Impacto.....	17
2.2.3	Propriedades da Superfície de Impacto	18
2.3	Simulação Laboratorial do Desgaste Erosivo.....	18
2.4	Processos de Deposição de Revestimentos por Aspersão Térmica.....	20
2.4.1	Processo de Deposição por Chama de Alta Velocidade (HVOF).....	21
2.4.2	HVOF com Etanol como Combustível	22
2.4.3	Princípios de Funcionamento do Processo HVOF	22
2.5	Revestimentos a base de carboneto de cromo.....	24
3	METODOLOGIA	26
3.1	Caracterização da Matéria-prima.....	26
3.1.1	Composição Química e Morfologia	27
3.2	Deposição dos revestimentos pela técnica HVOF	27
3.2.1	Preparação do Substrato para Deposição.....	28
3.2.2	Parâmetros de Deposição	28
3.3	Caracterização Metalográfica	30
3.3.1	Preparação Metalográfica dos Corpos de Prova	30
3.3.1.1	Amostras para Caracterização Microestrutural.....	31
3.3.1.2	Amostras para Ensaio de Erosão por Jato de Lama.....	32
3.3.2	Microscopia Eletrônica de Varredura do revestimento	32
3.3.3	Análise de espessura, porosidade e densidade do revestimento aplicado	32
3.3.4	Avaliação da microdureza para os diferentes parâmetros de deposição de carboneto de cromo por HVOF	33

3.4	Avaliação da Resistência do Revestimento ao Ensaio de Erosão por Jato de Lama	34
4	RESULTADOS	37
4.1	Caracterização do Revestimento.....	37
4.1.1	Espessura do Revestimento	37
4.1.2	Análise de Porosidade	39
4.1.3	Microdureza Vickers do Revestimento	40
4.2	Avaliação do Desgaste Erosivo por Jato de Lama	40
4.2.1	Análise da Perda Volumétrica.....	40
4.3	Discussão dos resultados	43
5	CONCLUSÃO	45
	REFERÊNCIAS	46

1 INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos, a garantia da integridade estrutural e a previsibilidade da vida útil de peças e componentes são pilares fundamentais na engenharia mecânica e de materiais. Conforme destaca Campos (2021), um componente chega ao fim de sua vida quando apresenta falhas críticas, como deformação plástica, propagação de trincas, processos de corrosão ou desgaste. Entre esses fenômenos, o desgaste por erosão merece destaque especial. Nesse contexto Finnie (1995) relata que o desgaste por erosão se dá pela remoção progressiva de material ocasionada pelo impacto de partículas sólidas arrastada pelo escoamento de um fluido.

Este fenômeno é amplamente estudado devido aos impactos que provoca em diversos setores industriais, desde processos de extração de petróleo e beneficiamento de minérios até a geração de energia por meio de hidrelétricas. O processo de manutenção ou substituição dos componentes erodidos é uma atividade complexa e onerosa. Diante de tal cenário, a tribologia assume um papel estratégico. Segundo Jost (1990), a análise tribológica correta evita significativas perdas financeiras ao demonstrar os mecanismos de falha, em particular em operações mais severas.

Para mitigar os efeitos do desgaste por erosão, a engenharia recorre a soluções a partir da aplicação de proteções superficiais. Bertuol (2020) destaca que a utilização de revestimentos de elevada resistência, como é o caso dos carbonetos aplicados por aspersão térmica, é uma das estratégias mais eficientes. Um exemplo conhecido é a liga Cr_3C_2 25(Ni20Cr), amplamente utilizada devido às suas propriedades e características.

A definição dos melhores métodos e materiais de revestimento visando proteger superfícies contra o fenômeno da erosão ainda é um tema que gera muitas dúvidas. Fatores como a aderência do revestimento e espessura da camada influenciam diretamente na eficácia da proteção, no que se refere a minimização do desgaste. Tais incertezas evidenciam a necessidade de pesquisas complementares que busquem otimizar as variáveis envolvidas, contribuindo assim para um maior controle e eficiência dos revestimentos obtidos.

Dentre as técnicas de aspersão térmica, o processo HVOF (*High-Velocity Oxy-Fuel*) destaca-se na deposição de revestimentos *cermets*, devido ao menor

tempo de permanência das partículas na chama e às temperaturas de operação mais baixas quando comparadas ao *Plasma Spray*. Essas características minimizam o fenômeno da descarbonetação, preservando as fases duras do material. Conforme Bertuol (2020) destaca, os revestimentos obtidos apresentam elevada dureza, baixa porosidade e excelente resistência ao desgaste erosivo, características ideais para operações em condições extremas.

Portanto, o objetivo deste trabalho é analisar o desempenho do revestimento a base de carboneto de cromo, especificamente o Cr_3C_2 25(Ni 20Cr), para diferentes parâmetros de deposição do processo HVOF.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar o desempenho microestrutural e a resistência ao desgaste por erosão do revestimento de Cr_3C_2 25(Ni20Cr) depositado pelo processo de aspersão térmica de alta velocidade (HVOF) utilizando etanol como combustível.

1.1.2 Objetivos específicos

- Verificar a microdureza dos revestimentos depositados por HVOF, correlacionando a dureza e a coesão da matriz com a resistência ao desgaste erosivo.
- Analisar o efeito dos ângulos de incidência no impacto das partículas, quantificando a perda volumétrica e identificando a sensibilidade do revestimento a diferentes condições.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A vida útil de um componente mecânico é determinada pela sua capacidade de manter a funcionalidade de fabricação frente a diversos processos de desgaste. Segundo Rasu (2023) tais processos podem ocorrer de forma isolada ou combinada, levando ao fim de vida do componente. Também sob uma perspectiva classificatória Zhang *et al.*, (2024) propõe que os modos de falha podem ser amplamente caracterizados em duas classes principais, os independentes do tempo e os dependentes do tempo.

No grupo de falhas independentes do tempo destacam-se as falhas por deformação plástica, que leva a problemas com ruptura dúctil ou frágil, além da nucleação e propagação de trincas. Em contrapartida, entre os processos dependentes do tempo destacam-se a corrosão que se caracteriza pela destruição do corpo sólido por meio da ação química ou eletroquímica e as várias formas de desgaste. Este último, foco central deste estudo, caracteriza-se como um dos mecanismos mais críticos para a indústria devido a sua natureza progressiva e aos impactos diretos na eficiência operacional.

2.1 Mecanismos de Desgaste Erosivo

Para Tanner e Dugger (2003), o desgaste é definido como o processo de remoção de material de uma superfície sólida devido à ação mecânica. Campos (2021) complementa que os movimentos relativos causadores de degradação em componentes podem ser divididos em quatro tipos principais: deslizamento, rotação, impacto e oscilação. A severidade desses fenômenos é influenciada por um conjunto de fatores, incluindo:

- **Propriedades Mecânicas:** As características inerentes dos materiais em contato, como dureza e tenacidade, desempenham um papel crucial na determinação de como o desgaste ocorre.
- **Propriedades Químicas:** As relações químicas que envolvem as superfícies, podem afetar diretamente nas taxas de perda de material, por mecanismos corrosivo-erosivos.

- Condições de Contato: As interações entre superfícies ocasionam pressão e velocidade, onde estas influenciam diretamente na taxa de remoção.
- Fatores Ambientais: A presença de substâncias contaminantes ou variação de temperatura no ambiente podem influenciar e alterar significativamente a resposta do material.
- Atrito: Este mecanismo é um dos principais causadores de desgaste, pois as forças de cisalhamento geradas na superfície colaboram para o desprendimento de partículas superficiais.

Embora a relevância econômica desses fenômenos de desgaste seja frequentemente subestimada e deixada de lado, ela retrata um dos principais fatores de perda de desempenho industrial, e isso impacta consideravelmente no fator econômico, Holmberg e Erdemir (2017) avaliam que cerca da metade dos custos de manutenção em indústrias de mineração provem da manutenção de componentes desgastados. Complementarmente, Kang *et al.* (2024) ressalta que os efeitos cumulativos provenientes de custos de manutenção, tempo de inatividade produtiva, dos riscos à segurança e do desperdício energético, acarretam perdas substanciais. Para Bertuol (2020), o desgaste erosivo ocasiona a degradação dos componentes, comprometendo a confiabilidade dos sistemas, exigindo intervenções complexas e onerosas.

Segundo Finnie (1995) o desgaste erosivo ocorre quando uma superfície é submetida ao impacto repetitivo de partículas sólidas suspensas em um fluido, resultando na remoção gradual de material. Bertuol (2020) enfatiza que a compreensão desse mecanismo exige a análise de variáveis cruciais como a velocidade e o ângulo de impacto do jato.

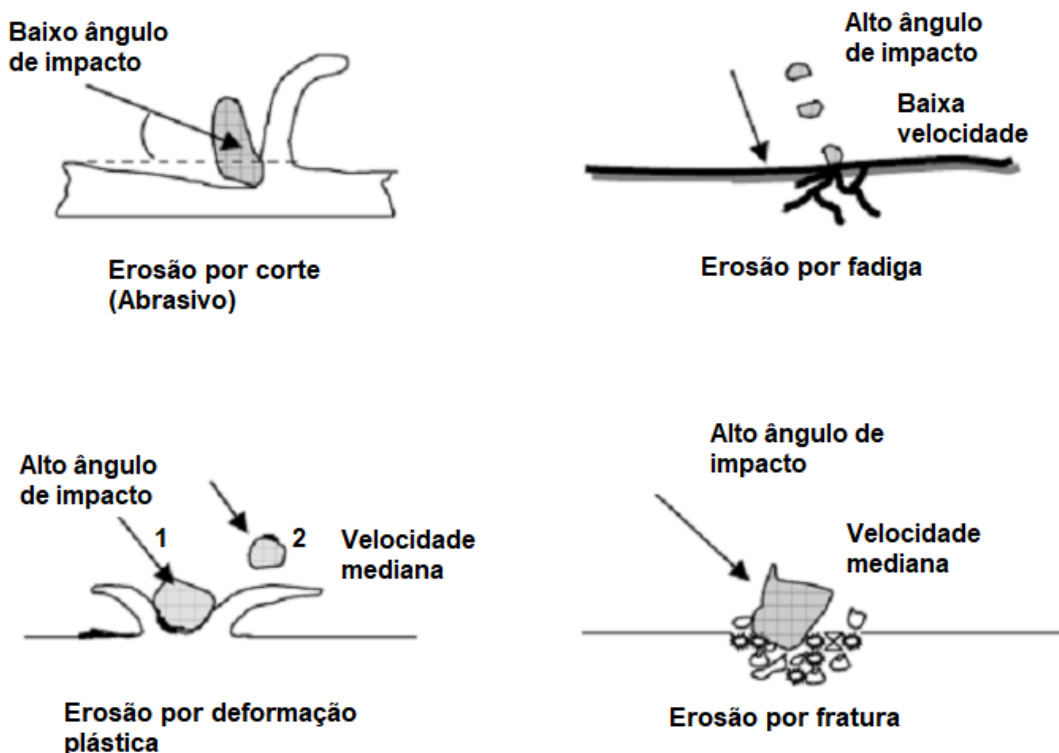
Esse processo é sobretudo relevante em setores industriais que operam sob condições severas, Ewald (2011) pontua o caso de exposição em sistemas mecânicos da indústria de petróleo e gás, geração de energia por meio de hidrelétricas e processamentos químicos, locais onde os componentes estão frequentemente expostos a fluxos de partículas erodentes. Como ilustrado na Figura 1, em casos onde o fluxo de partículas atinge a superfície com um baixo ângulo de impacto, predomina o mecanismo de erosão por corte (abrasivo), gerando perda de massa por cisalhamento. De forma contrária, para altos ângulos de impacto e baixas

velocidades, predomina a erosão por fadiga. Os impactos ocasionados não removem o material imediatamente, mas acumulam deformações e tensões na superfície, ocasionando a propagação de microtrincas, que posteriormente causam a soltura de fragmentos.

Quando o ângulo de impacto é alto e a velocidade é mediana, o comportamento do material varia a depender de sua tenacidade. No caso de matérias dúcteis, ocorre a chamada erosão por deformação plástica. O impacto da partícula gera uma cratera com material deslocado, que posteriormente é removido pelo impacto de outras partículas. Já no caso de materiais frágeis, ocorre a erosão por fratura, caracterizada pela alta concentração de tensões na região de impacto, que ocasiona a quebra em forma de estilhaços da superfície, gerando alta perda de massa por delaminação.

Esse mecanismo de impacto contínuo de erodentes pode acarretar em alterações significativas na geometria dos componentes, resultando em falhas precoces, redução da eficiência operacional e elevação de custos de manutenção.

Figura 1 - Mecanismos de erosão por impacto de partículas sólidas.



Fonte: Adaptado de Vargas; Toro, (2008)

2.2 Fatores Relevantes no Desgaste Erosivo

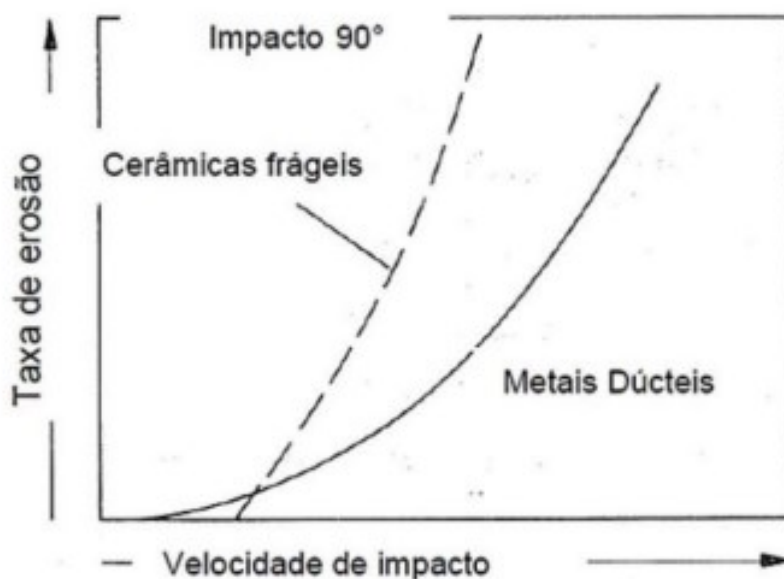
A análise da Figura 1 permite identificar que a severidade do desgaste ocasionado pelo impacto de partículas sólidas não depende de uma única variável, mas da interação entre parâmetros operacionais e propriedades dos materiais envolvidos.

2.2.1 Velocidade de Impacto

De acordo com Buszko e Zakrzewska (2024), a taxa de erosão é extremamente sensível a velocidade de impacto. À medida que a velocidade das partículas aumenta, as tensões mecânicas geradas na interface entre as partículas e a superfície do material intensificam-se, resultando em um regime de desgaste mais severo. Costa (2023) reforça que esse fenômeno decorre do aumento da energia cinética gerada pela turbulência do escoamento, sendo transferida para o material alvo no momento da colisão, o que amplifica os mecanismos de desgaste. A Figura 2 ilustra o efeito dessa variável na taxa de erosão para materiais dúcteis e frágeis sob um ângulo de incidência de 90°.

O gráfico demonstra que o aumento na velocidade de impacto resulta na elevação progressiva e não linear da taxa de erosão para ambas as classes de materiais. Porém, é notável que a taxa de desgaste progride de forma mais lenta nos materiais dúcteis do que nos materiais frágeis. Isso ocorre porque os materiais dúcteis dissipam a energia cinética do impacto por meio de mecanismos de deformação plástica. Por outro lado, os materiais frágeis não possuem essa capacidade de deformação plástica, ocasionando elevada concentração de tensões que geram a nucleação de trincas e, conseqüentemente, a remoção de material, tornando sua curva de desgaste significativamente mais elevada com o aumento da velocidade.

Figura 2 - Influência da velocidade de impacto na taxa de erosão para materiais dúcteis e frágeis.



Fonte: Adaptado de Zum Gahr (1987)

2.2.2 Ângulo de Impacto

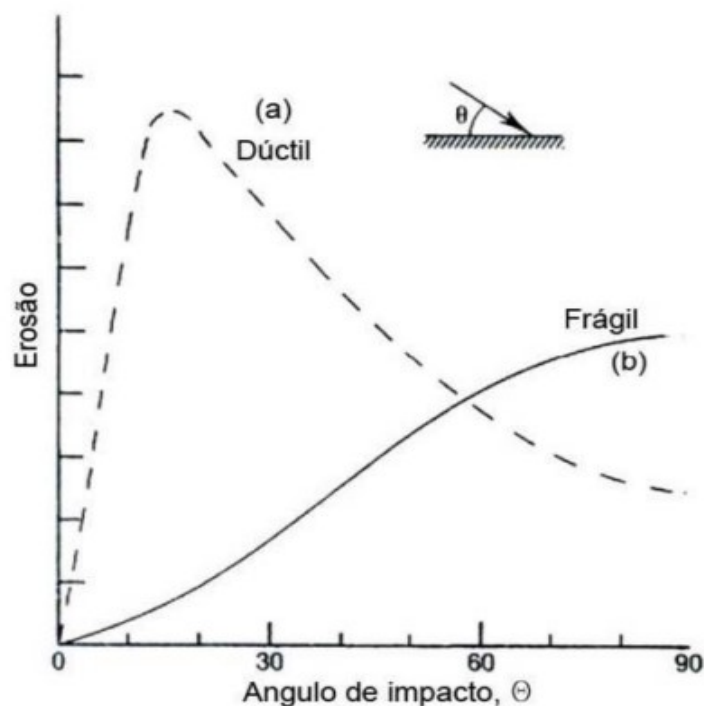
O segundo fator de grande relevância para determinar o mecanismo de remoção de material é o ângulo de incidência. Silva *et al.* (2023) identificaram que o comportamento erosivo é intrínseco à natureza do material.

- **Materiais frágeis:** Apresentam taxas de desgaste máximas para ângulos próximos a 90°, mecanismo esse conhecido como impacto normal, onde a energia se dissipa através da propagação de trincas e formação de regiões de crateras.
- **Materiais dúcteis:** Demonstra aumento na taxa de desgaste para ângulos baixos, geralmente entre 20° e 30°, onde predomina o mecanismo de corte devido ao deslizamento da partícula sob a superfície.

A Figura 3 demonstra o comportamento distinto entre materiais dúcteis e frágeis à medida que o ângulo de impacto varia. Para materiais dúcteis (curva "a"), as maiores taxas de erosão ocorrem para baixos ângulos de incidência, onde predomina o mecanismo de corte na superfície; a taxa decresce para ângulos mais elevados. Isso está novamente ligado à capacidade de dissipar a energia do impacto por meio da deformação plástica. De forma oposta, os materiais frágeis (curva "b") têm desgaste mínimo para ângulos menores, com perda de massa crescente

conforme o ângulo aumenta. Esse fenômeno é explicado pela ausência de capacidade de deformação plástica para absorção do impacto das partículas, ocasionando a propagação de trincas e a remoção de material da superfície.

Figura 3 - Influência do ângulo de incidência das partículas no comportamento erosivo.



Fonte: Adaptado de Hutchings; Shipway (2017)

2.2.3 Propriedades da Superfície de Impacto

Além dos fatores ligados a dinâmica de escoamento do fluido que gera o desgaste, as propriedades intrínsecas do material de revestimento, influenciam significativamente na resistência ao desgaste erosivo. Características como dureza, tenacidade e ductilidade do material, estão relacionados diretamente com o desempenho do material. Belém *et al.* (2020) destaca que a compreensão desses fatores é fundamental quando se deseja desenvolver sistemas mais duráveis e eficientes em ambientes erosivos, considerando que a dureza impede a penetração da partícula, enquanto a tenacidade evita que ocorra a fratura catastrófica do revestimento em condições severas de impacto.

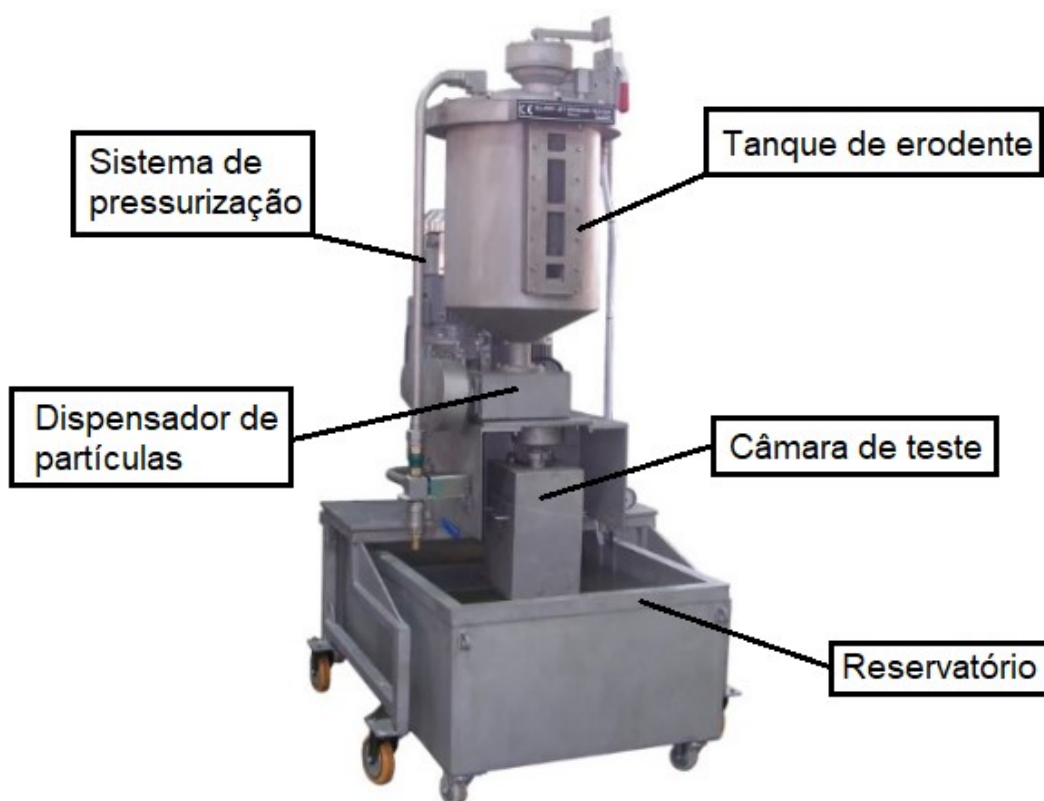
2.3 Simulação Laboratorial do Desgaste Erosivo

O método de ensaio de erosão por jato de lama (*slurry jet erosion*) é uma técnica padronizada e amplamente utilizada para avaliação da resistência de

materiais ao desgaste erosivo em condições laboratoriais controladas. Conforme enfatiza Vicenzi (2007), a importância da precisão do aparato experimental para simulações realistas dos sistemas de erosão, é fundamental, uma vez que as variáveis do equipamento influenciam diretamente a repetibilidade e credibilidade dos resultados.

A Figura 4 ilustra o equipamento de ensaio da marca DUCOM, similar ao utilizado neste estudo.

Figura 4 - Equipamento de ensaio erosivo da empresa DUCOM.



Fonte: Adaptado de DUCOM Material Characterization Systems (2021)

As principais especificações técnicas do equipamento estão detalhadas a seguir:

- Velocidade de impacto: até 50 m/s;
- Taxa de erodente: 100 a 2000 cc/min (ajustável);
- Ângulos de impacto: 15°, 30°, 45°, 60°, 75° e 90°;
- Diâmetro do bico: 4 mm;
- Tamanho de amostra: 25 x 24 x 4 - 8 mm;
- Capacidade do reservatório de mistura: 60 litros.

Nesse modelo de equipamento uma mistura de areia e água é impulsionada sob pressão através de um bico direcionador, atingindo a superfície da amostra. Para Kang *et al.* (2024), a obtenção de uma análise abrangente do desgaste erosivo, passa pela explicação das forças hidráulicas envolvidas; portanto, o controle do fluxo de partículas permite simular de forma mais realista os ambientes industriais severos.

Segundo a Ducom (2021), o diferencial desse equipamento reside no controle preciso da velocidade e do fluxo de partículas, além da facilidade de ajuste do ângulo de incidência. Estes recursos possibilitam a comparação de desempenho para diferentes materiais e revestimentos, gerando dados confiáveis com relação a taxa de desgaste e o comportamento mecânico superficial.

Bertuol (2020) ressalta que o mecanismos de ensaio pelo método de jato de areia úmida relaciona principalmente as interações entre as partículas sólidas em movimento e a superfície do material alvo. Estas partículas normalmente transportadas pelo escoamento de água impactam diretamente a superfície com energia suficiente para gerar micro cortes, deformação plástica ou fraturas, onde estes efeitos dependem diretamente da microestrutura do material.

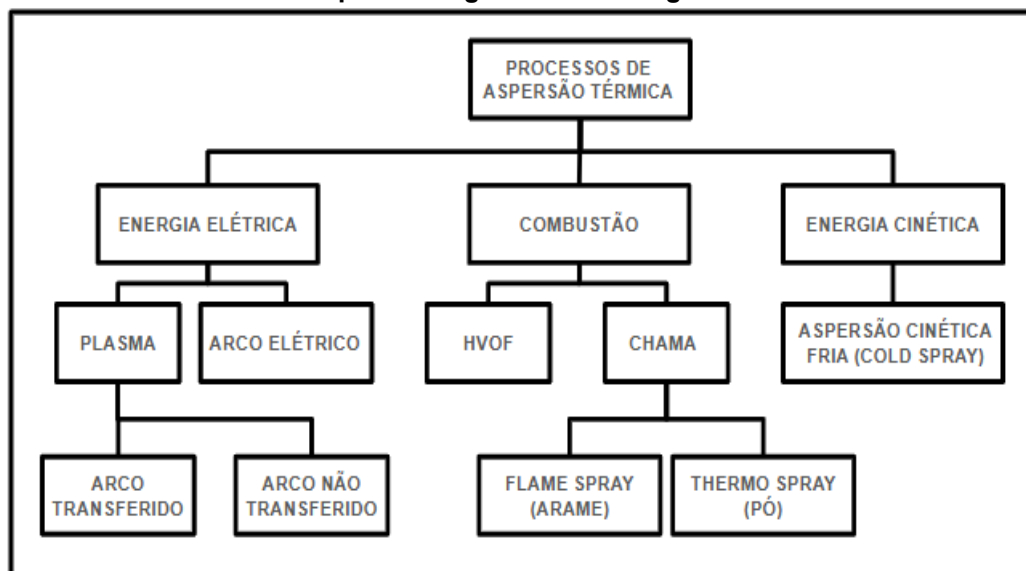
Por fim, um fator determinante para os resultados experimentais é o tempo de exposição. Santa *et al.* (2009) destaca o desgaste do material tende a aumentar de forma proporcional ao tempo de ensaio, demonstrando, na maioria dos casos, um comportamento linear de perda volumétrica.

2.4 Processos de Deposição de Revestimentos por Aspersão Térmica

Segundo Pawlowski (2008), os processos de deposição de revestimentos por aspersão térmica utilizam de uma fonte de energia para gerar um fluxo de gases que impulsionam as partículas de matéria-prima em direção à superfície onde o revestimento será aplicado. De forma geral, a fonte de energia aquece a matéria-prima, até o estado fundido ou semi-fundido. O impacto da partícula contra o alvo promove o empilhamento de camadas, proporcionando uma estrutura densa e uniforme.

A Figura 5 apresenta de forma generalizada um fluxograma de classificação dos principais processos de aspersão de acordo com a fonte de energia empregada.

Figura 5 - Classificação dos principais processos de aspersão térmica de acordo com seu processo gerador de energia.



Fonte: Adaptado de Paredes (2012).

2.4.1 Processo de Deposição por Chama de Alta Velocidade (HVOF)

Conforme Pawlowski (2008) explica, o processo de deposição por HVOF (*High Velocity Oxygen Fuel*) consiste na geração de um fluxo de gases de combustão em alta velocidade que transportam e aceleram as partículas de matéria prima. O impacto destas partículas em alta velocidade sobre o substrato promove a deformação plástica das mesmas, resultando em revestimentos com características notáveis. Vicenzi (2007) reforça que, o processo HVOF é amplamente reconhecido por sua capacidade de produzir revestimentos de alta densidade, baixa porosidade e excelente adesão mecânica, características que o tornam uma ótima solução em ambientes de desgaste severo.

Liu *et al.* (2023) reforçam que o processo de HVOF emergiu como uma das tecnologias mais avançadas para fabricação de revestimentos do tipo *cermet* (cerâmica-metal), destacando-se pelas seguintes propriedades:

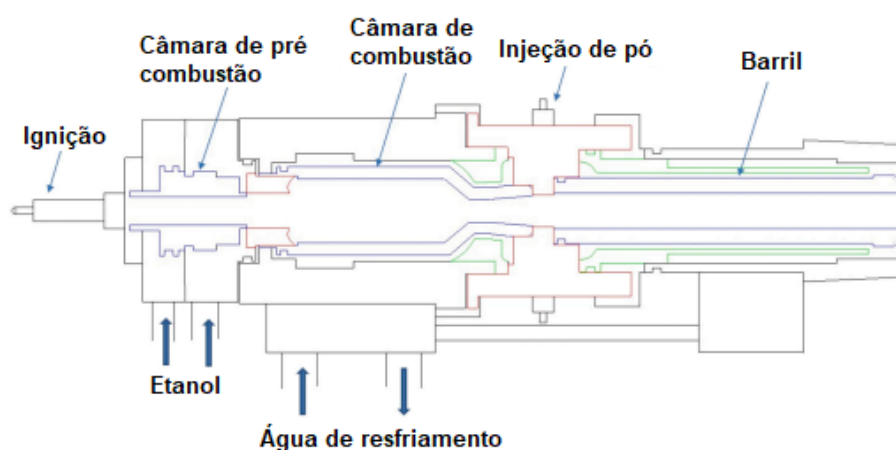
- Baixa porosidade residual;
- Elevada dureza e resistência mecânica;
- Boa tenacidade;
- Menor grau de descarbonetação;

2.4.2 HVOF com Etanol como Combustível

Liu *et al.* (2021) ressalta que o processo de HVOF com utilização de etanol como combustível representa uma das tecnologias mais recente desenvolvida. A escolha de etanol apresenta vantagens estratégicas em relação aos demais combustíveis líquidos, como a sustentabilidade ambiental e a redução de emissão de poluentes.

A Figura 6 detalha o funcionamento de uma tocha configurada para este combustível.

Figura 6 - Desenho esquemático da tocha para combustível etanol.

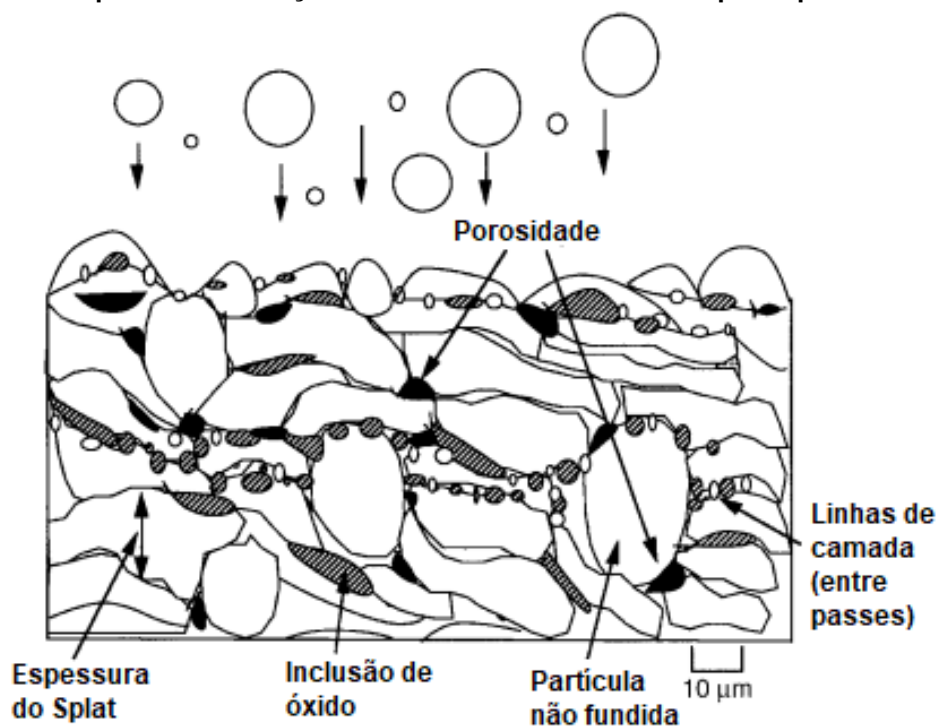


Fonte: Adaptado de Liu *et al.* (2021).

2.4.3 Princípios de Funcionamento do Processo HVOF

Pawlowski (2008) explica que, o processo HVOF baseia-se na combustão interna de uma mistura de combustível (líquido ou gasoso) e oxigênio. A expansão desses gases através de um bocal (geralmente do tipo convergente-divergente) resulta em uma chama de elevada temperatura e velocidades que podem atingir níveis supersônicos. Bertuol (2020) complementa, dizendo que, que a técnica alcança velocidades de chama de até 2000 m/s, resultando em fluxos de partículas entre 400 m/s e 800 m/s, sob temperaturas entre 1600 °C a 2200 °C. Conforme descreve Vicenzi (2007), o termo correto para denominar a deformação achatada de partículas deformadas plasticamente sobre a superfície é lamela. E a sobreposição dessas lamelas origina a chamada estrutura lamelar, contendo poros, partículas não fundidas e inclusões de óxidos. Conforme ilustrado na Figura 7.

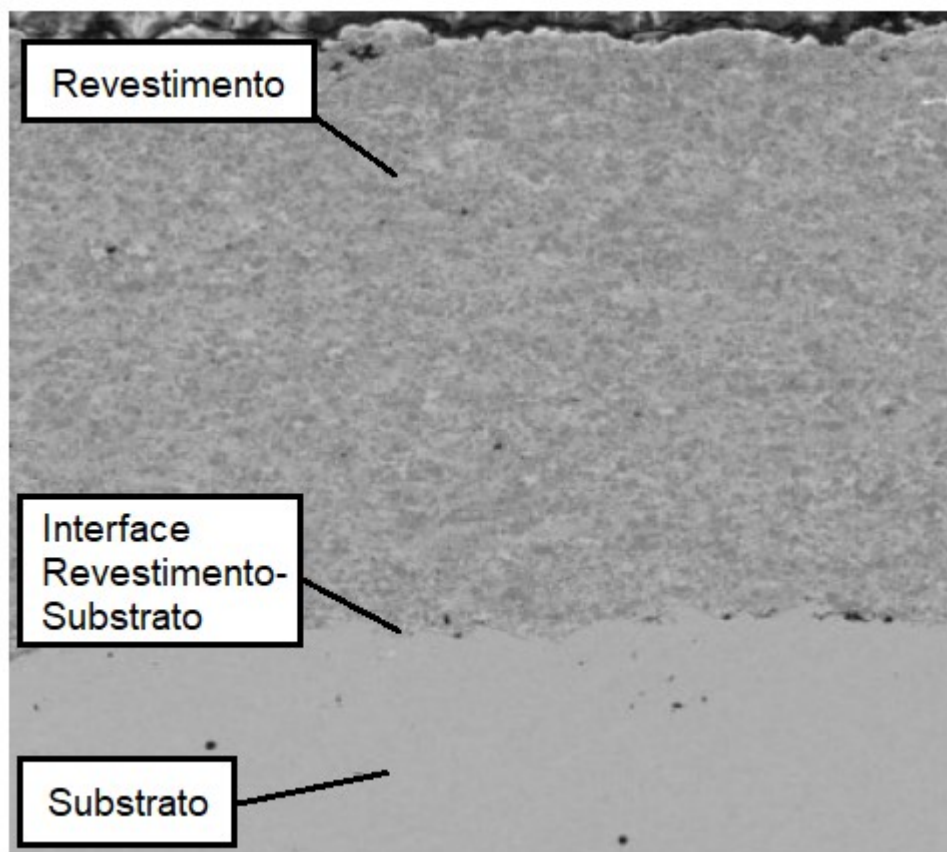
Figura 7 - Esquema da formação de camadas de revestimento por aspersão térmica.



Fonte: Adaptado de Crawmer (2013).

Vicenzi (2007) salienta ainda que a distribuição granulométrica das partículas é fundamental para a obtenção de propriedades homogêneas, reduzindo a presença de defeitos que fragilizam o revestimento, como é o caso da porosidade. A Figura 8 apresenta a micrografia obtida por meio da técnica HVOF. Nota-se a interface clara entre o substrato e a camada depositada, assim como a baixa incidência de poros, resultado da escolha correta da granulometria da partícula e do adequado controle dos parâmetros de aplicação.

Figura 8 - Microestrutura depositada por HVOF.



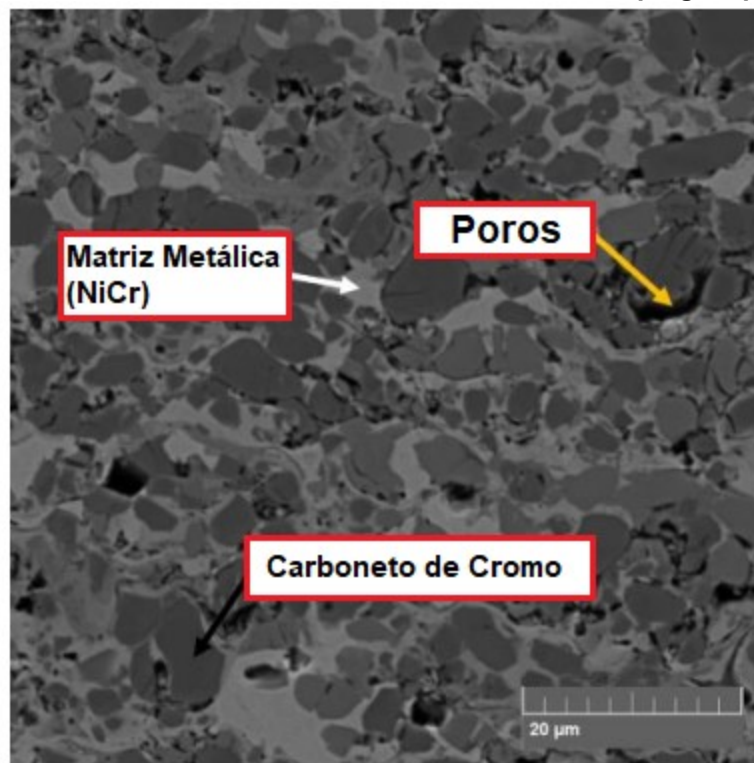
Fonte: Adaptado de Ribas (2019).

2.5 Revestimentos a base de carboneto de cromo

Bertuol (2020) destaca que, o carboneto de cromo Cr_3C_2 25(Ni20Cr) é um *cermet* (compósito cerâmico de matriz metálica) que apresenta como característica marcante a boa resistência ao desgaste. Essa propriedade é proporcionada por sua matriz tenaz de níquel-cromo com presença de partículas dispersas de carboneto de cromo, que possuem elevada dureza.

A Figura 9 ilustra a microestrutura típica deste revestimento, onde estão destacadas as fases de partículas duras (Cr_3C_2) fixadas na matriz metálica (NiCr), além da presença residual de poros.

Figura 9 - Microestrutura do revestimento Cr_3C_2 25NiCr aspergido por HVOF.



Fonte: Adaptado de Ribas (2019).

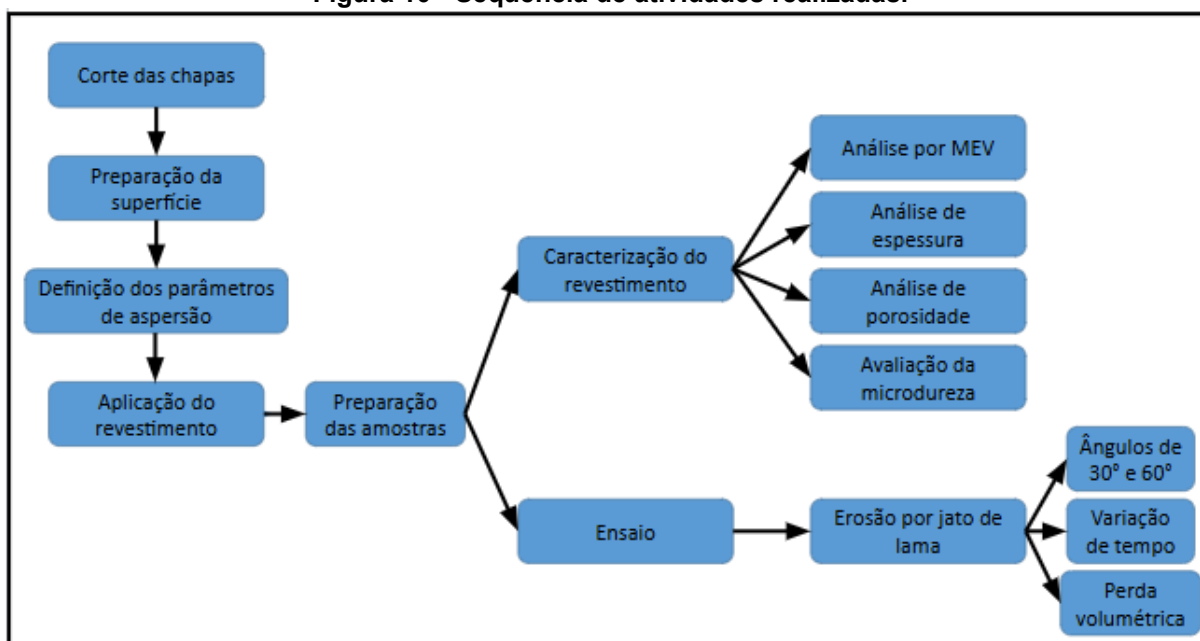
Vicenzi (2007) pontua que, para atingir a máxima eficiência contra o desgaste erosivo, é necessário que o revestimento apresente cerca de 80% de fase dura em sua composição.

Desse ponto de vista, Bertuol (2020) ressalta que a capacidade do revestimento de proteger o substrato não depende exclusivamente da composição química da camada aplicada, mas também das propriedades mecânicas intrínsecas dos carbonetos, bem como do controle rigoroso dos parâmetros de processamento. Além disso, Oliveira (2022) complementa que a homogeneização do tamanho de partículas da matéria-prima proporciona um revestimento melhor estruturado, ou seja, mais denso, com porosidade significativamente reduzida e melhor qualidade de superfície.

3 METODOLOGIA

Esta seção do trabalho, apresenta de forma detalhada a descrição dos materiais e métodos adotados para alcançar os objetivos propostos. Trata-se de uma pesquisa de natureza aplicada cujo desenvolvimento baseou-se na revisão de literatura e na condução de procedimentos experimentais. Todas as etapas da metodologia foram cuidadosamente planejadas e executadas com o intuito de se obter dados consistentes e de relevância para compreensão do fenômeno analisado. A Figura 10 representa um organograma da sequência das atividades realizadas para alcançar os objetivos deste trabalho.

Figura 10 - Sequência de atividades realizadas.



Fonte: Autoria própria (2026)

3.1 Caracterização da Matéria-prima

Nesta etapa, descreve-se o material utilizado no processo de deposição dos revestimentos. O pó de Carboneto de Cromo com matriz de Níquel-Cromo foi adquirido junto ao fabricante Oerlikon Metco e atende pelo nome de Woka 7205.

3.1.1 Composição Química e Morfologia

A Tabela 1 apresenta a composição química nominal da liga, composta por uma fração de 75% em peso de fase dura (Cr_3C_2) e 25% de matriz metálica (Ni20Cr).

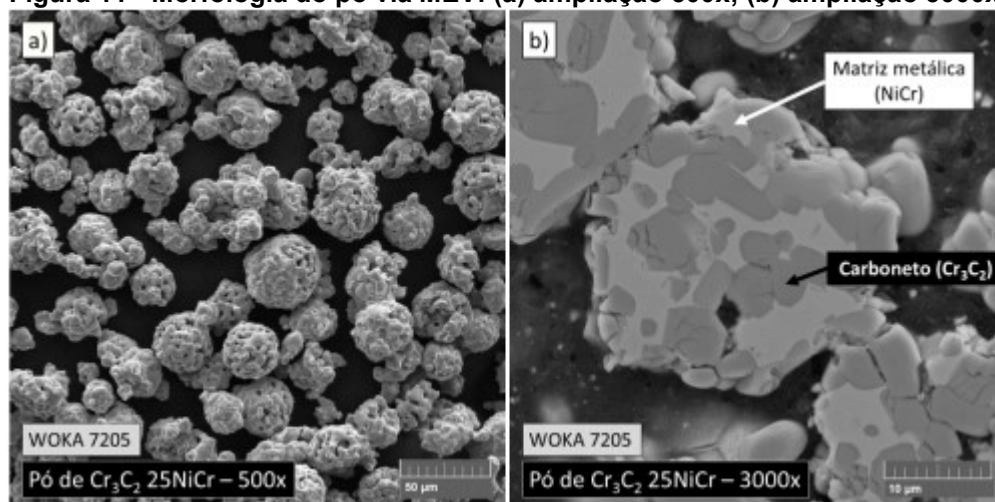
Tabela 1 - Composição química nominal do pó Cr_3C_2 25(Ni20Cr).

Produto	Porcentagem de Peso (nominal)			
	Cr	C (total)	Ni	Fe
Woka Série 7200	Balanço	9,0 – 10,2	17,5 – 22,5	< 0,5

Fonte: Adaptado de Oerlikon Metco (2024)

A Figura 11 apresenta a morfologia do pó, observada via Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), revelando partículas com formato predominantemente esférico, característica está resultante do processo de fabricação por aglomeração e sinterização.

Figura 11 - Morfologia do pó via MEV: (a) ampliação 500x; (b) ampliação 3000x.



Fonte: Bertuol (2020)

A distribuição granulométrica também é um fator determinante para a eficiência de fusão e velocidade de impacto. Para este estudo, foi utilizado o pó comercial Woka 7205 com granulometria nominal ($D_{95} = 38 \mu\text{m}$ e $D_5 = 10 \mu\text{m}$), dados estes fornecidos pelo fabricante Oerlikon Metco.

3.2 Deposição dos revestimentos pela técnica HVOF

A seguir são descritos os procedimentos realizados para deposição do revestimento.

3.2.1 Preparação do Substrato para Deposição

O material utilizado como substrato foram chapas de aço SAE 1020, com dimensões de 200 mm de comprimento, 25 mm de largura e 2,2 mm de espessura. Antes da etapa de aplicação do revestimento, esses corpos de prova passaram por uma etapa de preparação de superfície, realizada por meio de jateamento abrasivo, as especificações do processo são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros do processo de jateamento.

Parâmetro	Especificação
Material Abrasivo	Oxido de Alumina (Al_2O_3)
Pressão do Ar	8 Bar
Granulometria do Abrasivo	500 μm (mesh de 30)
Distância de Jateamento	120 – 150 mm

Fonte: Autoria própria (2026)

Todo o processo de limpeza e preparação de superfície foi realizado junto ao Instituto LACTEC.

3.2.2 Parâmetros de Deposição

Dentre as alternativas tecnológicas existentes, o processo High-Velocity Oxy-Fuel (HVOF), foi selecionado para execução deste trabalho. Esta escolha justifica-se pelas vantagens microestruturais do HVOF, que combina altas velocidades de partícula e temperaturas moderadas de chama, resultando em revestimentos com elevados níveis de densidade e adesão mecânica. A seleção deste processo de deposição foi motivada também por critérios de viabilidade, visto que o desenvolvimento experimental foi facilitado pela cooperação científica com o Instituto Lactec situado na cidade de Curitiba - PR, que disponibilizou equipamento e a infraestrutura de laboratório necessária para a realização das deposições.

Ao todo foram selecionados três diferentes conjuntos de parâmetros de deposição, todos utilizando o pó Cr_3C_2 25(Ni20Cr), com objetivo de avaliar a influência destas variações nas propriedades do revestimento. O equipamento de deposição utilizado foi pistola eGun™ da marca FST (*Flame Spray Technologies*) com bocal de 4 polegadas e movimentação robotizada por meio de um equipamento KUKA modelo 09. A descrição dos parâmetros selecionados esta presenta na Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros de deposição.

Valores calculados					Valores utilizados no equipamento		
Amostra	Distância de deposição (mm)	Fluxo mássico dos gases (g/s)	Estequiometria	Taxa de alimentação de pó (g/min)	Vazão oxigênio (l/min)	Vazão etanol (l/h)	Alimentador de pó (rpm)
P1	250	16	0,8	40	420	27,6	8,00
P2	250	18	1	60	515	26,1	10,50
P3	300	20	0,8	60	525	34,2	10,50

Fonte: Autoria própria (2026)

O processo de deposição dos revestimentos seguiu um procedimento operacional padronizado visando garantir a repetibilidade e homogeneidade das camadas. Foi utilizado como combustível o etanol anidro (99,9%), com ciclo de aplicação dividido em duas etapas principais:

1ª Etapa: Realização do pré-aquecimento do substrato por meio de 2 passes de chama, buscando reduzir o choque térmico inicial.

2ª Etapa: Consiste na deposição do revestimento, executada por meio de 12 passes sucessivos da matéria-prima, de modo a obter camadas mais uniformes e que atinjam maiores espessuras.

A Figura 12 representa a trajetória percorrida pela tocha para execução de um passe completo sobre a superfície.

Figura 12 - Esquema da trajetória de varredura durante um passe de deposição.



Fonte: Autoria própria (2026)

Essa abordagem experimental permite a comparação dos efeitos das diferentes combinações de parâmetros nas relações morfológicas e funcionais do revestimento.

3.3 Caracterização Metalográfica

Neste tópico, é apresentado detalhadamente como as amostras foram preparadas para análise da microestrutura, medição de espessura e quantificação da porosidade do revestimento depositado.

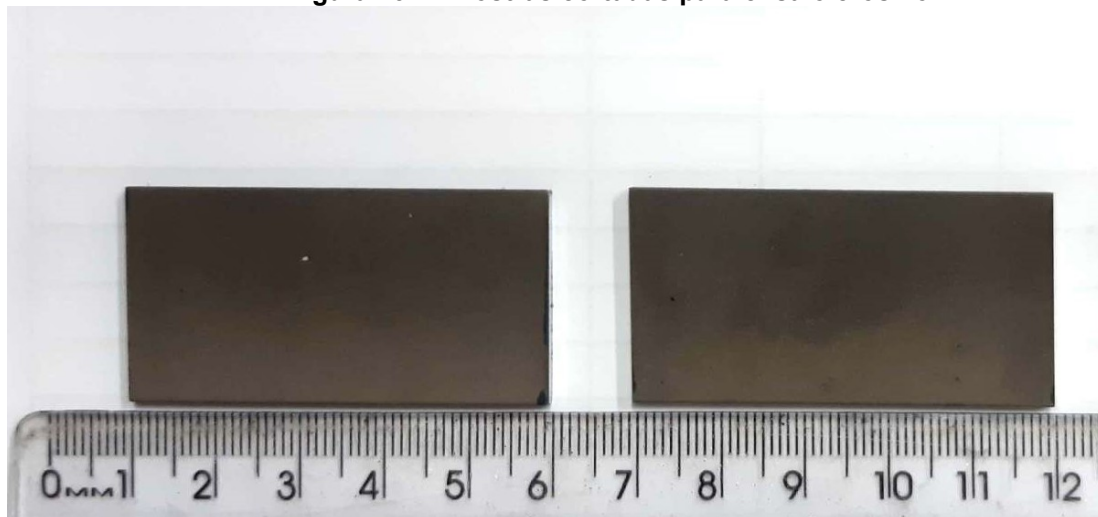
3.3.1 Preparação Metalográfica dos Corpos de Prova

Após a aplicação do revestimento, as chapas de aço SAE 1020 foram seccionadas para obtenção dos corpos de prova. O procedimento de corte foi realizado em uma cortadora metalográfica de precisão, modelo *IsoMet™ 4000* da marca BUEHLER, localizada no laboratório C²MMa da UTFPR – PG.

As amostras destinadas aos ensaios de erosão por jato de lama possuem dimensões de 50 mm de comprimento por 25 mm de largura, conforme ilustra a Figura 13.

Também foram produzidas amostras específicas para a caracterização microestrutural, as quais passaram pelo processo de embutimento a quente em baquelite. Para essa etapa, foi utilizado o equipamento *SimpliMet™ XPS1* também da marca BUEHLER.

Figura 13 - Amostras cortadas para ensaio erosivo.



Fonte: Autoria própria (2026)

É importante ressaltar que, para cada uma das condições de revestimento aplicadas, as amostras de erosão para ângulos de 30° e 60° e a amostra para caracterização microestrutural foram extraídas de uma mesma chapa depositada. Desta forma é possível garantir que as análises metalográficas estejam correlacionadas aos pares de amostras ensaiados, assegurando a homogeneidade das propriedades do revestimento em todos os ensaios.

As amostras destinadas à caracterização microestrutural e aos ensaios de erosão foram submetidas a processos distintos de preparação superficial, conforme descrito a seguir.

3.3.1.1 Amostras para Caracterização Microestrutural

O procedimento teve início em uma lixadeira e politriz semiautomática, modelo *Beta* da marca BUEHLER. O lixamento foi realizado conforme a seguinte sequência granulométrica das lixas 80, 220, 600, 1200 e 2000 mesh, garantindo o nivelamento e remoção uniforme de material superficial. Na sequência executou-se o polimento manual utilizando suspensão de diamante de 3 µm até a remoção completa dos riscos remanescentes do lixamento. O acabamento final, com aspecto

espelhado, foi obtido com o uso da suspensão de diamante de 0,25 μm , condição essa adequada para as análises em microscopia óptica e eletrônica de varredura.

3.3.1.2 Amostras para Ensaio de Erosão por Jato de Lama

Para as amostras destinadas a erosão, buscou-se inicialmente padronizar as condições da superfície do revestimento. Utilizou-se o mesmo equipamento, porém, empregando-se lixas diamantadas com granulometria de 220, 600 e 1200 mesh, seguidas pelo protocolo de polimento usando as mesmas suspensões de diamante de 3 μm e 0,25 μm . Essa padronização visa mitigar a influência de irregularidades superficiais, assegurando que os efeitos erosivos observados sejam exclusivamente decorrentes dos mecanismos erosivos do ensaio, e não de defeitos pré-existent no revestimento.

3.3.2 Microscopia Eletrônica de Varredura do revestimento

A análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi realizada em um equipamento da marca TESCAN modelo *Vega 3LM* presente no Laboratório C²MMA da UTFPR - PG, com objetivo de investigar a morfologia da superfície do revestimento aplicado. Essa técnica permite a observação em alta resolução da distribuição das fases, presença de poros e a interface entre revestimento e substrato. As análises foram conduzidas em diferentes regiões do revestimento, visando garantir a representatividade dos resultados obtidos.

3.3.3 Análise de espessura, porosidade e densidade do revestimento aplicado

Para análise de espessura do revestimento foi utilizado um microscópio óptico da marca ZEISS modelo *MRc 5*, com auxílio do software de análise de imagens *AxioVision SE 64*. Para esse processo foram retiradas imagens com aumento de 200x, sendo então traçadas 10 linhas de medição para cada amostra, da ponta externa do revestimento até a região de interface com o substrato.

Para análise e verificação do percentual de porosidade presente no revestimento foi utilizado o método de teste descrito na norma ASTM E2109 – 01 (2021) – *Standard Test Methods for Determining Area percentage porosity of Thermal*

Spray Coatings. Nesse método, todas as imagens precisam ser ajustadas em relação ao contraste e à escala de tons de cinza, com o objetivo de tornar a visualização e identificação dos poros mais claras e precisas. Esses ajustes também foram feitos utilizando o software *AxioVision SE 64*.

Baseado no estudo de Matikainen *et al.* (2019), sabe-se que a densidade teórica para o Cr_3C_2 25(Ni20Cr) é $7,04 \text{ g/cm}^3$. Ao relacionar esse valor com a porosidade obtida por meio da Equação 1, obtemos os resultados de densidade do revestimento para cada uma das amostras.

$$\rho_r = \rho_t * \left(1 - \frac{P}{100}\right) \quad (1)$$

3.3.4 Avaliação da microdureza para os diferentes parâmetros de deposição de carboneto de cromo por HVOF

Os testes foram conduzidos no equipamento *Microdurômetro Shimadzu HMV-G20 Series* presente no Laboratório C²MMA da UTFPR – PG, seguindo os procedimentos estabelecidos pela norma ASTM E384 (2022) - *Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials*.

As medições foram realizadas na secção transversal das amostras, permitindo a construção de um perfil de dureza desde a superfície do revestimento até o substrato. O microdurometro utilizado estava equipado com um indentador piramidal de diamante de base quadrada, aplicando-se uma carga de 300 gf ($\text{HV}_{0,3}$) com tempo de penetração de 15 segundos.

A Figura 14 ilustra o método de indentação adotado, destacando o espaçamento entre medidas visando evitar a interferência entre medições adjacentes.

Figura 14 - Esquema de medições de microdureza.



Fonte: Autoria própria (2026)

3.4 Avaliação da Resistência do Revestimento ao Ensaio de Erosão por Jato de Lama

Os ensaios de erosão por jato de lama foram realizados utilizando o equipamento DUCON – *Slurry Jet Erosion Tester*, também disposto no laboratório C²MMa localizado na UTFPR – PG, com auxílio da norma ASTM G73-10 (2021) - “*Standard Test Method for Liquid Impingement Erosion Using Rotating Apparatus*” e adaptado para uso com jato de lama.

Esse ensaio por jato de lama é realizado com o intuito de avaliar o desempenho dos revestimentos frente a condições elevadas de desgaste erosivo. A Tabela 4 apresenta os parâmetros utilizados durante o ensaio.

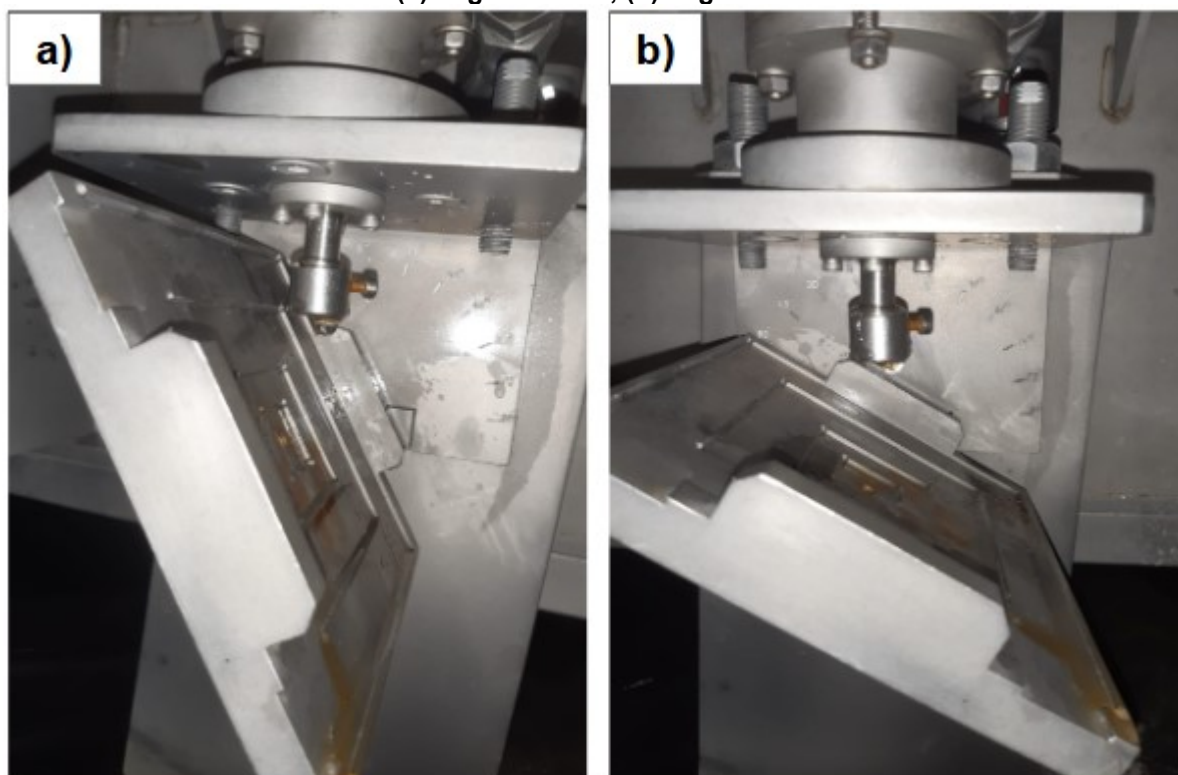
Tabela 4 - Parâmetros do ensaio de desgaste por jato de lama.

Parâmetros	Detalhes
Ângulos de impacto	30° e 60°
Erodente	Areia
Tamanho do erodente	200 - 400 μm
Diâmetro do bocal	3 mm
Vazão do erodente	1788 g/min (30 rpm)
Distância do jato	50 mm
Velocidade do jato	25,5 m/s (750 rpm)
Tempos de ensaio	30, 30, 60, 120, 120 e 120 (= 480) segundos

Fonte: Autoria própria (2026)

O sistema de ajuste do ângulo de incidência do equipamento de erosão é apresentado na Figura 15. A Figura 15a demonstra a configuração para ângulo de 30°, enquanto a Figura 15b detalha o posicionamento para 60°.

**Figura 15 - Sistema de angulação do equipamento;
(a) ângulo de 30°; (b) ângulo 60°.**



Fonte: Autoria própria (2026)

Ao final de cada ciclo de ensaio, foi realizada a limpeza das amostras com a utilização de um banho ultrassônico da marca *7lab* para remoção de possíveis resíduos abrasivos aderidos a superfície. Na sequência, procedeu-se com a secagem dos corpos de prova, seguida pela etapa de pesagem na balança de precisão modelo *Shimadzu AUX220*. Este procedimento foi seguido com intuito de quantificar a perda de massa incremental, comparando o valor obtido com a massa inicial registrada. Desta forma, com os valores de perda de massa, é possível medir a perda volumétrica e a taxa de desgaste para cada teste.

4 RESULTADOS

Este capítulo apresenta e discute os resultados obtidos, de modo a correlacionar a microestrutura do revestimento Cr_3C_2 25(Ni20Cr) com suas propriedades mecânicas e seu desempenho frente ao desgaste erosivo. A análise tem início pela caracterização microestrutural do revestimento, visando estabelecer os fundamentos para interpretação da resistência final do sistema.

4.1 Caracterização do Revestimento

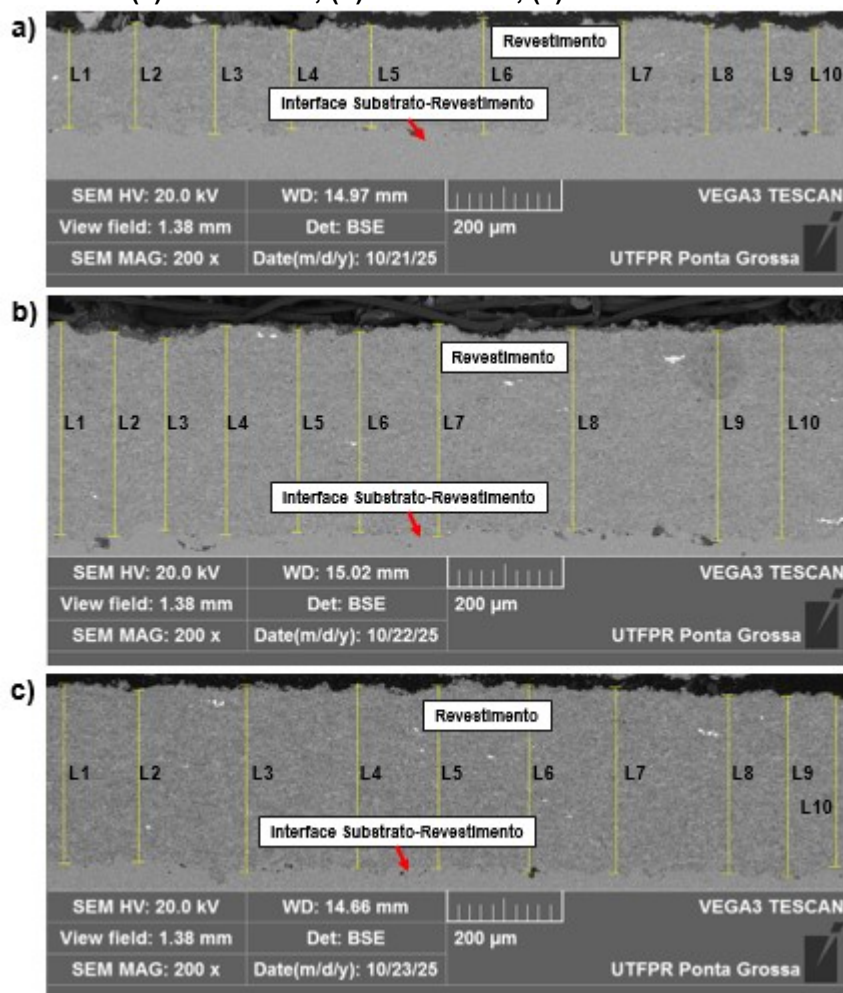
Nesta seção, são apresentados os resultados da caracterização física e microestrutural dos revestimentos depositados via HVOF.

4.1.1 Espessura do Revestimento

As espessuras dos revestimentos foram obtidas por meio da microscopia eletrônica na seção transversal das amostras. Este parâmetro garante que a camada depositada possua dimensões suficientes para suportar os esforços decorrentes do ensaio de desgaste erosivo.

A Figura 16 apresenta as imagens utilizadas durante o processo de medição, onde é possível observar a uniformidade de camada ao longo do substrato.

**Figura 16 - Análise da espessura do revestimento;
(a) amostra P1; (b) amostra P2; (c) amostra P3.**



Fonte: Autoria própria (2026)

Os valores obtidos são apresentados na Tabela 5, demonstrando os valores médios e o desvio padrão para cada resultado.

Tabela 5 - Resultados da análise de espessura do revestimento.

Amostra	Espessura Média (em μm)
P1	$181,93 \pm 9,76$
P2	$354,25 \pm 11,99$
P3	$312,63 \pm 10,68$

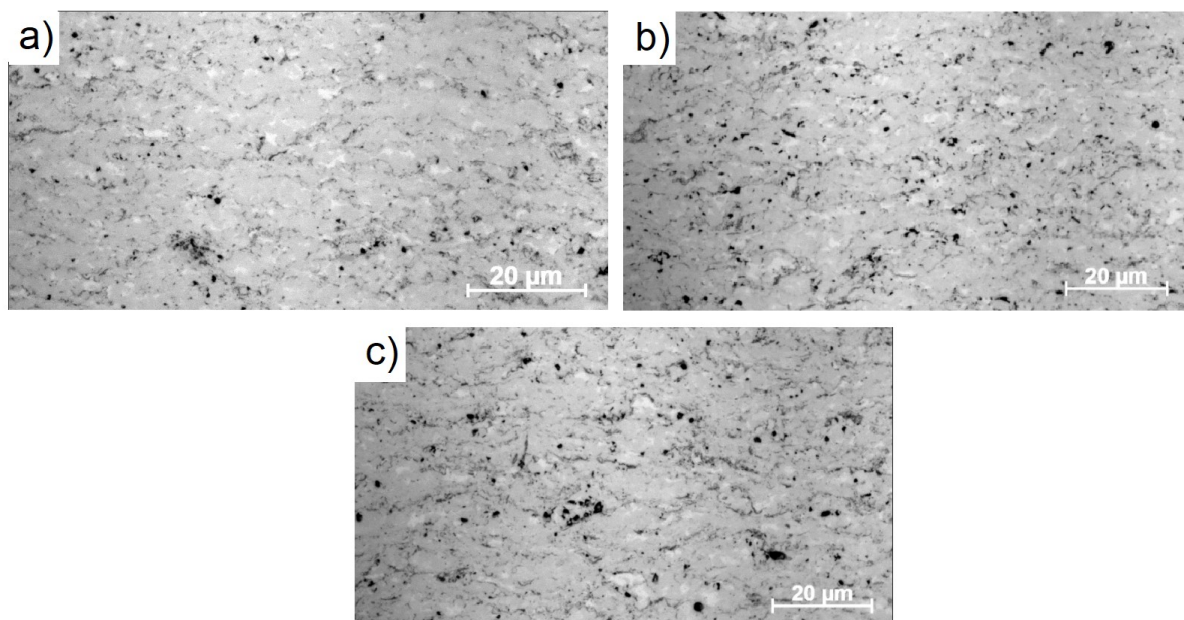
Fonte: Autoria própria (2026)

A partir dos resultados obtidos é possível verificar que a variação da espessura ficou abaixo dos 6%, percentual este que confirma a uniformidade na deposição do revestimento e a estabilidade do processo HVOF.

4.1.2 Análise de Porosidade

A avaliação da porosidade do revestimento, fator este que influencia diretamente na resistência a penetração e na coesão da matriz metálica. Foi verificado por meio da análise da micrografia da seção transversal, uma estrutura densa (densidade obtida através da Eq. 1), com alguns vazios residuais distribuídos de forma isolada, conforme apresentado na Figura 17.

Figura 17 - Análise da porosidade com aumento de 200x; (a) amostra P1; (b) amostra P2; (c) amostra P3.



Fonte: Autoria própria (2026)

Observa-se na Tabela 6 os resultados da análise de porosidade para cada uma das amostras avaliada.

Tabela 6 - Resultados da análise de porosidade e densidade do revestimento.

Amostra	Porosidade %	Densidade (g/cm³)
P1	1,69 ± 0,3	6,92
P2	2,64 ± 0,38	6,85
P3	2,32 ± 0,35	6,88

Fonte: Autoria própria (2026)

Conforme observado também no estudo de Ribas (2019), a porosidade encontrada no revestimento depositado pelo parâmetro 1 é característica do processo HVOF, enquanto as amostras processadas pelos parâmetros 2 e 3 sofreram, principalmente, a influência das variações nas condições de vazão de oxigênio e taxa de alimentação.

4.1.3 Microdureza Vickers do Revestimento

Por fim, a caracterização do revestimento foi realizada por meio de ensaios de microdureza Vickers na secção transversal. Esta análise é fundamental para verificar a homogeneidade das propriedades mecânicas e a resistência da camada, os resultados obtidos nessas medições são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Resultados da análise de microdureza do revestimento.

Amostra	Dureza (HV_{0,3})
P1	1290 ± 123,34
P2	1222 ± 133,65
P3	1246 ± 155,06

Fonte: Autoria própria (2026)

De acordo com o estudo de Oliveira (2023), os resultados de dureza obtidos estão diretamente relacionados à porosidade verificada durante a análise anterior, de modo que o revestimento com menor porosidade tende a apresentar maior dureza, enquanto o mais poroso resulta em menor dureza. Esses resultados servem como um indicador da resistência do revestimento aos mecanismos de desgaste que serão abordados na próxima seção.

4.2 Avaliação do Desgaste Erosivo por Jato de Lama

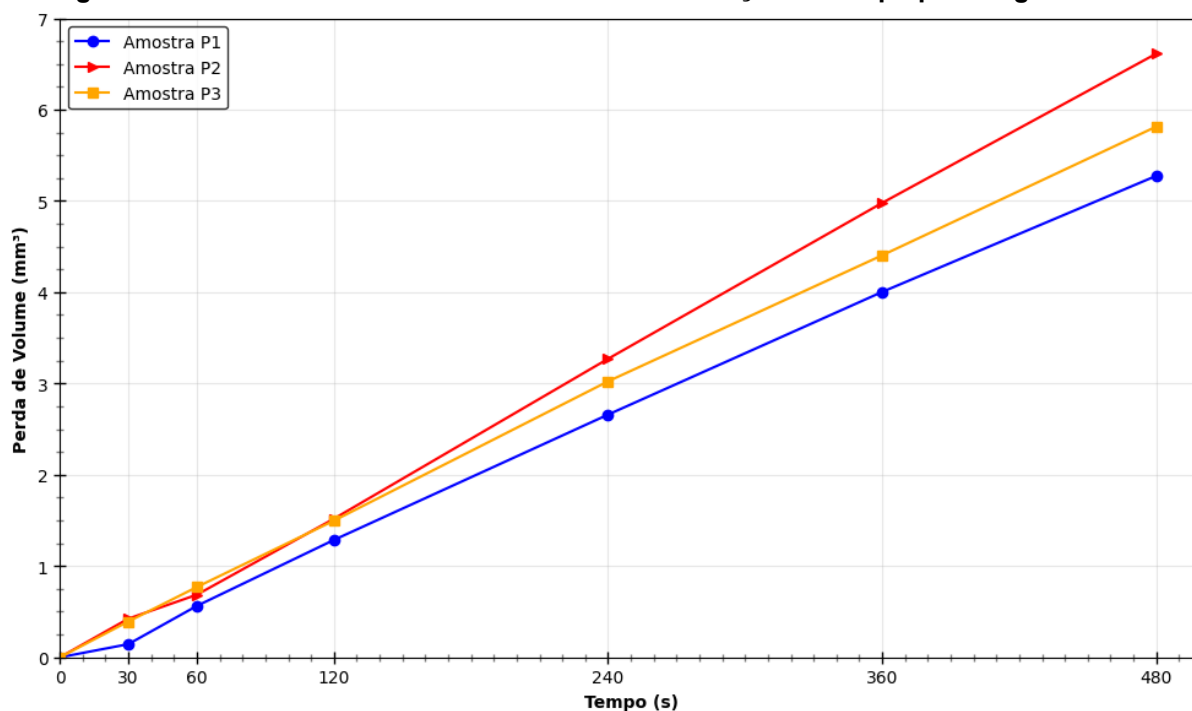
Nesta secção é apresentado o desempenho do revestimento frente ao ensaio de desgaste erosivo por jato de lama

4.2.1 Análise da Perda Volumétrica

Embora a perda de massa forneça resultados diretos quanto a pesagem, a análise da perda volumétrica é essencial para padronizar os resultados. Desta forma, os valores de perda de massa foram convertidos em perda de volume utilizando a densidade real de cada amostra, calculada anteriormente e com resultados apresentados na Tabela 6.

A Figura 18 apresenta os resultados de perda volumétrica para o ângulo de 30°.

Figura 18 - Perda volumétrica do revestimento em relação ao tempo para ângulo de 30°.



Fonte: Autoria própria (2026)

Visando melhor compreensão dos resultados, a Tabela 8 demonstra os resultados para taxa de desgaste para cada uma das amostras.

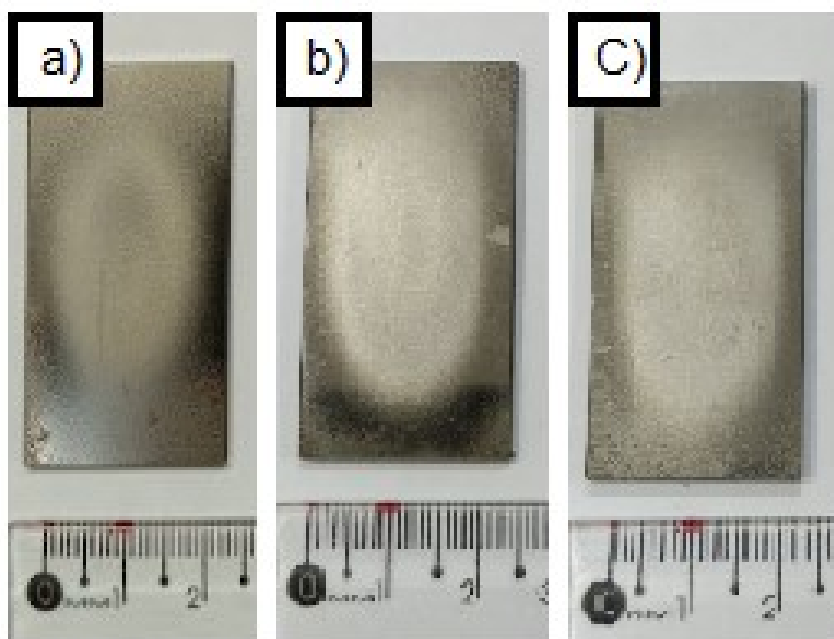
Tabela 8 - Taxa de desgaste erosivo por jato de lama para ângulo de 30°.

Amostra	Taxa volumétrica de desgaste (mm³/s)
P1	0,011
P2	0,014
P3	0,012

Fonte: Autoria própria (2026)

A caracterização visual das amostras desgastadas após o ensaio de erosão para o ângulo de 30° é apresentada na Figura 19.

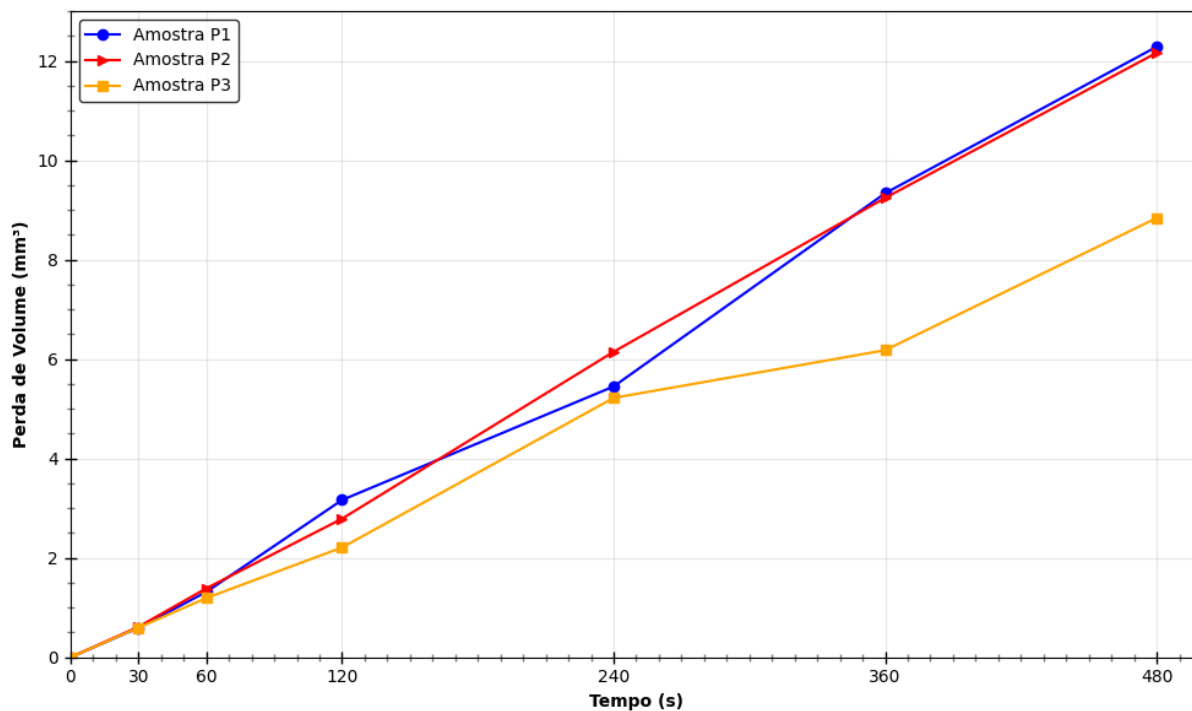
Figura 19 - Superfícies desgastadas para ângulo de 30°; (a) Parâmetro 1, (b) Parâmetro 2; (c) Parâmetro 3



Fonte: Autoria própria (2026)

Na sequência a Figura 20 detalha o resultado para o ângulo de 60°.

Figura 20 - Perda volumétrica do revestimento em relação ao tempo para ângulo de 60°.



Fonte: Autoria própria (2026)

Seguindo a mesma metodologia, a Tabela 9 apresenta os valores da taxa volumétrica de desgaste obtidos para o ângulo de incidência de 60°.

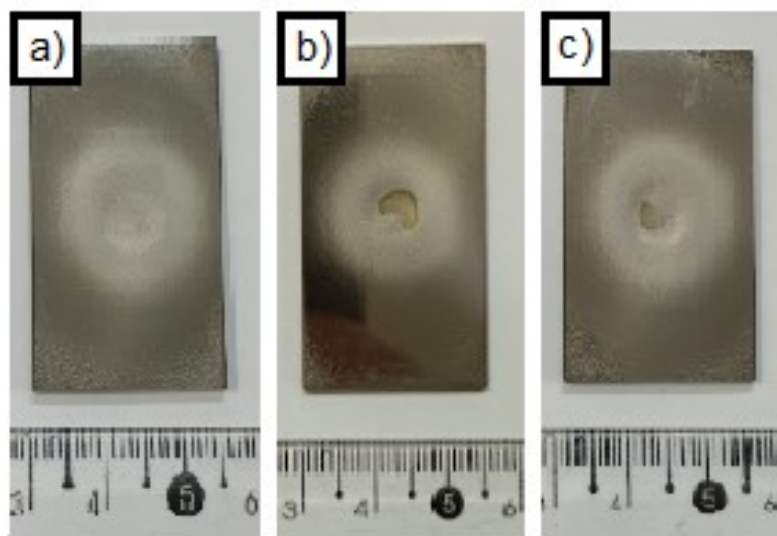
Tabela 9 - Taxa de desgaste erosivo por jato de lama para ângulo de 60°.

Amostra	Taxa volumétrica de desgaste (mm³/s)
P1	0,026
P2	0,025
P3	0,018

Fonte: Autoria própria (2026)

Na Figura 21, é possível verificar o estado da superfície ao final do ensaio de erosão para o ângulo de 60°. Fica evidente a maior severidade para esse parâmetro angular, a qual foi suficiente para ocasionar a formação de crateras de impacto nos revestimentos.

Figura 21 – Superfícies desgastadas para ângulo de 60°; (a) Parâmetro 1; (b) Parâmetro 2; (c) Parâmetro 3



Fonte: Autoria própria (2026)

4.3 Discussão dos resultados

A amostra depositada por meio do parâmetro 1 teve como características a formação de uma camada com elevada densidade microestrutural e o menor índice de porosidade residual entre todas as condições avaliadas, embora tenha apresentado uma menor espessura final. Em termos de propriedades mecânicas, a amostra demonstrou a eficiência da aspersão ao atingir níveis de microdureza superiores a 1200 HV.

Nos ensaios erosivos para 30°, o parâmetro 1 obteve o menor desgaste absoluto, pois, assim como analisado por Bertuol (2020), a baixa porosidade ameniza o surgimento de defeitos superficiais, promovendo a redução dos efeitos de

microsulcamento ocasionados pelo impacto das partículas. No entanto para o ensaio com angulação de 60°, a taxa de erosão foi mais acentuada. Isso pode estar ligado a fatores como a energia térmica necessária do processo, que ocasionou a redução da tenacidade do revestimento.

O parâmetro 2 apresentou uma condição de maior impacto do processo de deposição, com uma camada mais espessa do que o parâmetro 1, e mantendo a elevada resistência mecânica com microdureza superior a 1200 HV. No entanto, o arranjo das lamelas gerou uma estrutura com índice de porosidade mais elevado em comparação aos parâmetros 1 e 3, isso pode ser ocasionado pela maior taxa de alimentação com menor aporte térmico ocasionado pelo aumento na vazão de oxigênio.

O desempenho do parâmetro 2 para o ensaio de erosão em angulação de 30° obteve a taxa de desgaste mais elevada, e isso ocorre devido à maior incidência de defeitos na superfície ocasionados pela porosidade. Para o ensaio em 60°, os valores ficaram próximos aos do parâmetro 1, onde a porosidade elevada do parâmetro 2 atuou como o principal fator para aumento da taxa de desgaste.

A condição experimental do parâmetro 3 apresentou um comportamento considerado bastante interessante. Assim como as demais amostras, o revestimento atingiu valores superiores a 1200 HV de microdureza, com uma camada consideravelmente mais espessa que a do parâmetro 1. O índice de porosidade por sua vez, também obteve valores mais elevados em relação ao primeiro parâmetro, porém abaixo da porosidade residual do revestimento obtido pelo parâmetro 2.

Para os ensaios de erosão em 30°, o parâmetro 3 comportou-se de forma semelhante ao resultado do parâmetro 1, mesmo com uma maior porosidade. No entanto, para o ensaio com ângulo de 60° (que é mais agressivo para revestimentos compósitos de matriz metálica reforçados com partículas cerâmicas), o parâmetro 3 obteve uma resistência ao desgaste superior aos demais, conforme analisado por Vicenzi (2007), está relacionado à obtenção de uma microestrutura mais tenaz e menor microdureza, indicando que as condições de deposição utilizadas para ele foram mais efetivas em proporcionar ao revestimento resistência ao impacto das partículas erosivas, e assim mitigar o cenário de desgaste por erosão.

5 CONCLUSÃO

Com base nos resultados da caracterização da microestrutura e nos testes de desgaste por erosão, as principais conclusões deste trabalho são:

Observando a espessura e a porosidade, nota-se que o ajuste de parâmetros influencia de forma representativa o resultado final da deposição. O parâmetro 1 entregou um revestimento mais denso, com porosidade inferior a 2%, mesmo sendo uma camada mais fina. Já os parâmetros 2 e 3 conseguem depositar mais material, mas resultam em uma estrutura com mais poros, sendo superior a 2%.

Os resultados de microdureza confirmam que o processo de deposição foi bem executado e eficiente. Isso demonstra-se pelo fato de todos os parâmetros terem atingido valores que superam os 1200 HV, garantindo que o revestimento alcance a alta resistência mecânica esperada.

Nos ensaios a 30°, observamos que as taxas de desgaste foram mais baixas, o que é comum para essa angulação, já que o impacto das partículas é menos direto. Para esse cenário o parâmetro 1 apresentou o melhor desempenho, embora os outros parâmetros tenham ficado com valores bem próximos. Já para inclinação de 60°, a condição se torna bem mais agressiva para os materiais de característica frágil, como é o caso da liga de Cr_3C_2 25(Ni20Cr). Para esse teste o parâmetro 3 se destacou, apresentando uma taxa significativamente menor que os demais.

De modo geral, os testes mostraram que não existe um parâmetro único que seja melhor em todos os aspectos. O parâmetro 1 criou um revestimento mais íntegro e denso, com melhores resultados para situações de desgaste mais suave. Já o parâmetro 3, apesar de ser um pouco mais poroso mostrou maior resistência para aguentar impactos diretos e mais severos. Portanto, a correlação dos dados nos permite escolher o melhor ajuste de aspersão térmica a depender do ambiente ao qual o componente estará exposto.

REFERÊNCIAS

ASTM E384-22, N. Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials, ASTM International. **ASTM International**, 2022. Disponível em: < www.astm.org >.

ASTM E2109-01, N. Standard Test Methods for Determining Area Percentage Porosity in Thermal Sprayed Coatings. **ASTM International**, 2021. Disponível em: < www.astm.org >.

ASTM G73-10, N. Standard Test Method for Liquid Impingement Erosion Using Rotating Apparatus. **ASTM International**, 2021. Disponível em: < www.astm.org >.

BELÉM, M. J. X. *et al.* Avaliação da resistência ao desgaste erosivo e abrasivo de revestimentos WC 12Co aplicados por aspersão térmica HVOF. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [s. l.], vol. 25, nº 1, p. e-12583, 2020.

BERTUOL, K. **Estudo do efeito sinérgico cavitação/erosão em revestimentos de carboneto de cromo e tungstênio depositados por aspersão térmica de alta velocidade**. [s. l.], 2020.

BUSZKO, M. H.; ZAKRZEWSKA, D. E. The Influence of Impact Velocity on Stresses and Failure of S355j2 Steel Under Slurry Erosion Conditions. **Advances in Science and Technology Research Journal**, [s. l.], vol. 18, nº 7, p. 62–77, 2024.

CAMPOS, N. **Desenvolvimento e construção de equipamento de ensaio de desgaste por abrasão e impacto para classificação de materiais de placas de chutes**. 2021. - UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP, [s. l.], 2021.

COSTA, R. D. L. **Avaliação dos mecanismos de desgaste de componentes de bcs operando em meio com água salgada, abrasivo e gás CO₂**. [s. l.], 2023.

CRAWMER, D. E. Coating Structures, Properties, and Materials. *In*: TUCKER, R. C. (org.). **Thermal Spray Technology**. [S. l.]: ASM International, 2013. p. 60–64. Disponível em: <https://dl.asminternational.org/handbooks/book/12/chapter/132400/Coating-Structures-Properties-and-Materials>. Acesso em: 3 jul. 2025.

DUCON. **Slurry Jet Erosion Tester**. Disponível em: <https://www.ducon.com/slurry-jet-erosion-tester>. Acesso em: 2 março 2026.

EWALD, H. **Estudo do desgaste por erosão de ligas metálicas utilizadas em sistemas mecânicos de plantas siderúrgicas**. [s. l.], 2011.

FINNIE, I. Some reflections on the past and future of erosion. **Wear**, [s. l.], vol. 186–187, p. 1–10, 1995.

HOLMBERG, K.; ERDEMIR, A. Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions. **Friction**, [s. l.], vol. 5, nº 3, p. 263–284, 2017.

HUTCHINGS, I. M.; SHIPWAY, P. **Tribology: friction and wear of engineering materials**. 2nd eded. Oxford: Elsevier, 2017.

JOST, H. P. Tribology — Origin and future. **Wear**, [s. l.], vol. 136, nº 1, p. 1–17, 1990.

KANG, C. *et al.* Erosive Wear Caused by Large Solid Particles Carried by a Flowing Liquid: A Comprehensive Review. **Processes**, [s. l.], vol. 12, nº 6, p. 1150, 2024.

LECH PAWLOWSKI. **The science and engineering of thermal spray coatings**. Segundaed. [S. l.]: [s. d.], 2008.

LIU, S. *et al.* Effect of stoichiometry conditions on the erosion and sliding wear behaviors of Cr₃C₂-NiCr coatings deposited by a novel ethanol-fueled HVOF process. **Surface and Coatings Technology**, [s. l.], vol. 454, p. 129084, 2023.

LIU, S. *et al.* Novel liquid fuel HVOF torches fueled with ethanol: relationships between in-flight particle characteristics and properties of WC-10Co-4Cr coatings. **Surface and Coatings Technology**, [s. l.], vol. 408, p. 126805, 2021.

MATIKAINEN, V. *et al.* Erosion wear performance of WC-10Co4Cr and Cr₃C₂-25NiCr coatings sprayed with high-velocity thermal spray processes. **Surface and Coatings Technology**, [s. l.], vol. 370, p. 196–212, 2019.

OLIVEIRA, Rosivânia da Paixão Silva. **Efeito do pré-tratamento por moagem de alta energia de pós de Cr₃C₂-25NiCr no desempenho frente à fadiga de revestimentos aspergidos termicamente por HVOF sobre aço ASTM A516**. 2022. 85 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M), Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2022.

PAREDES, R. **Aspersão térmica**. 2012. 102 f. [s. l.], 2012.

RASU, Sakthivel. Component Wear and Fatigue Analysis in Mechanical Design. **International Journal for Multidisciplinary Research (IJFMR)**, v. 5, n. 4, p. 1-7, jul./ago. 2023.

RIBAS, M. T. **Influência da razão propano-oxigênio e do fluxo total de gases na resistência ao desgaste de revestimentos Cr_3C_2 -25NiCr depositados pelo processo hvof.** [s. l.], 2019.

SANTA, J. F. *et al.* Slurry and cavitation erosion resistance of thermal spray coatings. **Wear**, [s. l.], vol. 267, nº 1–4, p. 160–167, 2009.

SILVA *et al.* Slurry erosion wear of high chromium cast iron samples from a slurry pump impeller. Effect of impact angle variation. **World Journal of Advanced Engineering Technology and Sciences**, [s. l.], vol. 8, nº 2, p. 275–286, 2023.

TANNER, D. M.; DUGGER, M. T. Wear Mechanisms in a Reliability Methodology. *In: MICROMACHINING AND MICROFABRICATION*, 2003, San Jose, CA. (R. Ramesham & D. M. Tanner, Orgs.) **Anais [...]**. San Jose, CA: [s. d.], 2003. p. 22. Disponível em: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.476345>. Acesso em: 29 maio 2025.

VARGAS, J. C. B.; TORO, A. **Interdependencia entre las condiciones de operación y el desgaste en rodets tipo pelton fabricados en acero ASTM A743 grado CA6NM.** [s. l.], 2008.

VICENZI, J. **Relação entre microestrutura e erosão (a frio e a quente) de revestimentos do sistema NiCr- Cr_3C_2 obtidos por aspersão térmica.** [s. l.], 2007.

ZHANG, B. *et al.* Time-dependent reliability of corroded mild steel pipes by different failure modes. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, [s. l.], vol. 207, p. 105100, 2024.

ZUM GAHR, K.-H. **Microstructure and wear of materials.** Amsterdam New York: Elsevier, 1987. (Tribology series, nº 10).