

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

GEOVANA DE CAMPOS BRUSAMARELLO

**ANÁLISE DO DESGASTE EM REVESTIMENTOS PELO MÉTODO DE ASPERSÃO
TÉRMICA POR HVOF**

PONTA GROSSA

2024

GEOVANA DE CAMPOS BRUSAMARELLO

**ANÁLISE DO DESGASTE EM REVESTIMENTOS PELO MÉTODO DA
ASPERSÃO TÉRMICA POR HVOF**

Analysis of wear in coatings using the thermal spray method HVOF

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).
Orientador: Anderson Geraldo Marena Pukasiewicz.

PONTA GROSSA

2024



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.

GEOVANA DE CAMPOS BRUSAMARELLO

**ANÁLISE DO DESGASTE EM REVESTIMENTOS PELO MÉTODO DA
ASPERSÃO TÉRMICA POR HVOF**

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: 09 de Fevereiro de 2024

Anderson Geraldo Marena Pukasiewicz

Titulação: Doutorado

Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) Campus Ponta Grossa

Roger Navarro Verastegui

Titulação: Doutorado

Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) Campus Ponta Grossa

Sandra Mara Kaminski Tramontin

Titulação: Mestrado

Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) Campus Ponta Grossa

PONTA GROSSA

2024

AGRADECIMENTOS

Expresso minha profunda gratidão a Deus, por ter me concedido o suporte e a energia necessários para alcançar os objetivos de minha jornada acadêmica.

Agradeço meus pais, pela dedicação e investimento ao longo de todos os anos de minha vida, pelo amor e compreensão incondicionais, por serem fonte de força e determinação.

Meus sinceros agradecimentos ao meu professor orientador Anderson Geraldo Marenda Pukasiewicz, pelo constante apoio e orientação. Sua experiência e conhecimento foram fundamentais para a realização deste projeto de conclusão de curso.

Agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para que este trabalho fosse realizado com êxito. Vocês são parte desta conquista e serei eternamente grata a todo apoio e incentivo.

RESUMO

A Aspersão Térmica é uma técnica que amplamente tem sido utilizada nos setores industriais para melhorar propriedades dos materiais por meio de revestimentos. Desse modo, com o avanço do estudo científico sobre o tema, se faz necessário o entendimento das técnicas para expandir sua utilização. Uma das propriedades mais almejadas por meio de revestimentos é o aprimoramento da resistência ao desgaste. Este estudo, portanto, tem por objetivo analisar o comportamento de revestimentos aspergidos termicamente por HVOF (Combustão de Alta Velocidade com Oxigênio) e prover resultados eficientes sobre cada amostra analisada. Para isso utiliza-se medição de dureza, rugosidade, metalografia e ensaio de desgaste para seis revestimentos diferentes, sendo eles: Cr₃C₂ 7NiCr, Cr₃C₂ 10NiCr, Cr₃C₂ 25NiCr, WC12CO, WC10Co4Cr e Tribaloy. Os resultados consistem na comparação e efetividade particular de cada revestimento estudado, evidenciando o processo da aspersão como eficaz na proteção de materiais. Os resultados obtidos pelo estudo da aspersão térmica por HVOF revelam que o revestimento utilizando Tribaloy e WC10Co4Cr demonstraram maior resistência a perda de massa em comparação as outras opções avaliadas. Esse resultado sugere que o revestimento pode ser uma boa alternativa para desempenho em desgaste abrasivo.

Palavras-chave: Aspersão Térmica; Desgaste; HVOF.

ABSTRACT

Thermal Spray is a widely used technique in industrial sectors to improve material properties through coatings. Therefore, with the advancement of scientific research in this field, it is necessary to understand the techniques to expand their utilization. One of the most sought-after properties achieved through coatings is enhanced wear resistance. This study aims to analyze the behavior of thermally sprayed coatings by HVOF (High Velocity Oxygen Fuel) and provide efficient results for each analyzed sample. Hardness measurement, metallography, and wear testing are employed for this purpose for six different coatings: Cr_3C_2 7NiCr, Cr_3C_2 10NiCr, Cr_3C_2 25NiCr, WC12CO, WC10Co4Cr and Tribaloy.. The results involve the comparison and specific effectiveness of each studied coating, highlighting the thermal spray process as effective in material protection. The results obtained from the study of thermal spraying by HVOF reveal that the coating using Tribaloy and WC10Co4Cr demonstrated greater resistance to mass loss compared to the other options evaluated. This result suggests that the coating can be a good alternative for abrasive wear performance.

Keywords: Thermal Spray; Wear; HVOF.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivos	13
1.1.1	Objetivo Geral	13
1.1.2	Objetivos Específicos	14
1.2	Justificativa	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1	Definições e Fundamentos	15
2.2	Técnicas de Aspersão Térmica	16
2.2.1	Aspersão Térmica por Arco Elétrico	16
2.2.2	Aspersão Térmica por Plasma Spray	17
2.2.3	Aspersão Térmica por Chama	17
2.2.4	Aspersão Térmica por Chama de Alta Velocidade	18
2.2.5	Aspersão Térmica por Cold Spray	20
2.2.6	Aspersão Térmica por D-Gun	21
2.3	Métodos de Caracterização de Revestimentos	21
2.3.1	Técnicas de Análise de Microestrutura	22
2.3.1.1	<u>Metalografia</u>	<u>22</u>
2.3.2	Técnicas de Análise Química	22
2.3.3	Técnicas de Análise Cristalográfica	23
2.3.4	Técnicas de Análise de Adesão	23
2.3.5	Técnicas de Análise de Dureza	24
2.3.6	Ensaio Não-Destrutivo	25
2.4	Principais Revestimentos	25
2.5	Aplicações de Revestimentos Aspergidos	26
2.6	Tipos de Desgaste	27
3	METODOLOGIA	28
3.1	Revestimentos Selecionados	28
3.2	Análise Metalográfica	29
3.2.1	Preparação das Amostras	29
3.3	Ensaio de Dureza Vickers	30
3.4	Ensaio de Desgaste	32
3.5	Microscopia Óptica	34
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	36

4.1	Resultados Metalografia	36
4.2	Ensaio de Dureza.....	40
4.3	Ensaio de desgaste	44
4.4	Resultados de Rugosidade.....	50
5	CONCLUSÃO	59
	REFERÊNCIAS.....	60

1 INTRODUÇÃO

Desde os primórdios do desenvolvimento da civilização, o ser humano buscou técnicas para assertividade na seleção dos materiais para seus projetos. No início, pouco se sabia sobre as propriedades de relevância, entretanto, o avanço de conhecimento permitiu que atualmente não somente o material correto seja selecionado, como também o revestimento ideal possa ser planejado.

Os revestimentos, independentemente do campo de aplicação, possuem a característica de proteção e melhoria do substrato, ou seja, incorporam ao material características de interesse e muitas vezes são utilizados também para aprimoramento de performance tribológica.

Entre os métodos de revestimento, destaca-se a Aspersão Térmica, que teve seus princípios estabelecidos a partir da década de 60. Dentre as técnicas de aspersão térmica existentes destaca-se a Aspersão Térmica por Chama de Alta Velocidade (HVOF), que consiste na queima de oxigênio com gás combustível a alta pressão juntamente com o aquecimento e jateamento de pó. (LIMA,2007)

Neste contexto, as vantagens da aspersão térmica por HVOF são muitas e suas aplicações trazem benefícios em estudos sobre desgaste e corrosão. Por isso, aspersões por HVOF são amplamente utilizadas em aplicações industriais, todavia, ainda há necessidade de maior compreensão da efetividade de revestimentos aspergidos uma vez que há possibilidade de aprimoramento de suas aplicações.

Por consequência, o estudo e escolha do revestimento correto, traz vantagem financeira e robustez aos componentes produzidos, além de proporcionar maior abertura de utilização em diversos segmentos.

Neste estudo, para análise das características de interesse utiliza-se seis amostras de revestimentos obtidos pela técnica de aspersão térmica por HVOF, as quais foram submetidas a testes de Microdureza Vickers, Rugosidade, Metalografia e ensaio de desgaste abrasivo.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar a microestrutura e o comportamento dos revestimentos Cr_3C_2 7NiCr, Cr_3C_2 10NiCr, Cr_3C_2 25NiCr, WC12CO, WC10Co4Cr e Tribaloy aspergidos pela técnica HVOF quanto a resistência ao desgaste abrasivo.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar os revestimentos de Cr_3C_2 7NiCr, Cr_3C_2 10NiCr, Cr_3C_2 25NiCr, WC12CO, WC10Co4Cr e Tribaloy quanto a microdureza do revestimento e metal base de Aço1020;
- Avaliar os revestimentos de Cr_3C_2 7NiCr, Cr_3C_2 10NiCr, Cr_3C_2 25NiCr, WC12CO, WC10Co4Cr e Tribaloy quanto a metalografia dos materiais depositados;
- Diferenciar o comportamento de diferentes amostras aspergidas quanto a resistência à abrasão;
- Avaliar o parâmetro de rugosidade RA de cada revestimento ao longo do tempo de ensaio de desgaste.

1.2 Justificativa

A análise de propriedades de revestimentos aspergidos e seus comportamentos quanto ao desgaste proporciona ganhos financeiros, além de oferecer oportunidade de melhoria para projetos existentes e futuros, ou seja, as propriedades e comportamento de revestimentos aspergidos, permite maior assertividade na proteção de substratos, aumentando sua vida útil, reduzindo gastos com manutenção, corrosão, desgaste abrasivo e possibilitando que seja cada vez mais utilizado.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A seguir são apresentados os conceitos fundamentais para entendimento da metodologia de pesquisa e interpretação dos resultados.

Dentre os principais temas, temos a aspersão térmica e seus mecanismos de desgaste, além das características e propriedades dos revestimentos utilizados para estudo.

O processo de aspersão térmica faz parte da chamada “engenharia de superfícies”, a qual tem por objetivo contribuir para a utilização de revestimentos com propriedades interessantes de acordo com a aplicação do produto final. Utilizando-se desta tecnologia, em muitos casos não se faz necessário escolher materiais mais caros e menos acessíveis, mas sim escolher um revestimento adequado que atenda às necessidades desejadas. (LIMA,2007)

Embora os estudos sobre a aspersão sejam relativamente recentes, há relatos datados de 988 a.C onde se utilizavam o ouro para revestimento de superfícies, e posteriormente outras técnicas surgiram como a imersão em metal fundido. (LIMA,2007)

Segundo Carlos Camello Lima, o processo primitivo de aspersão foi baseado em técnicas da idade média. Foi em 1910 que pesquisadores na Suíça elaboraram o primeiro aparato de deposição de pó, que funcionava semelhantemente a uma máquina de jateamento por areia. Ainda pela mesma equipe de engenheiros, o mesmo processo foi aprimorado com a utilização de arame metálico, o que posteriormente atribuiria grande avanço para a área.

Foi a partir de 1960 que o processo ganhou atenção e passou a ter um forte desenvolvimento.

2.1 Definições e Fundamentos

Os revestimentos são formados de camadas mais espessas que tratamentos superficiais, por isso diferem-se conceitualmente. Existem alguns métodos de revestimentos como o CVD, PVD, eletrodeposição, soldagem, cladeamento e aspersão térmica. (LIMA,2007)

Aspersão térmica é um processo de revestimento no qual materiais metálicos ou não metálicos são depositados em um substrato preparado de forma fundida ou

semi-fundida. No processo de deposição, utiliza-se uma pistola de aspersão, onde o calor é gerado por meio de arco elétrico ou combustíveis. (FAUCHAIS,2014)

O processo pode ser descrito em três etapas: a fonte de calor funde o material selecionado, as partículas fundidas (ou semi-fundidas) são aceleradas por um gás comprimido e por fim as partículas impactam no substrato e são aplainadas.

Neste contexto, três conceitos são importantes: o substrato que é o material de superfície a ser aspergida, a camada de ligação, que se refere a ligação entre revestimento/substrato e a estrutura do revestimento, a qual vai determinar propriedades importantes do revestimento.

2.2 Técnicas de Aspersão Térmica

Dentro do processo de aspersão térmica há uma diferenciação por parte da nomenclatura de acordo com cada tipo de técnica utilizada para obter revestimentos.

Neste contexto, é possível classificar a aspersão térmica dentro de dois grupos, de acordo com a geração de calor. Se a geração for por meio de combustão, temos os processos por chama e D-Gun, caso seja por meio da eletricidade, há os processos de arco elétrico e plasma de arco.

2.2.1 Aspersão Térmica por Arco Elétrico

Na nomenclatura inglesa a aspersão por arco elétrico pode ser denominada Electric Arc Spraying ou o equivalente a aspersão por arco arame (Wire Arc Process). Neste processo, utiliza-se dois eletrodos com arame que geram uma diferença de potencial e que por meio de um gás em névoa atomiza o metal fundido e projeta as partículas no substrato. (PAWLOWSKI,2008)

Neste processo o aquecimento e fusão ocorrem pela alimentação dos arames e formação de um arco controlado. O gás utilizado é no geral ar comprimido, mas pode variar de acordo com a aplicação, pois argônio e hélio, por exemplo, podem gerar melhores resistências a oxidação. (PAWLOWSKI,2008)

Um fator limitante da técnica é a necessidade do material a ser utilizado ser eletricamente condutivo, mas por outro lado a taxa de deposição é maior na aspersão por arco do que nos outros processos.

2.2.2 Aspersão Térmica por Plasma Spray

A aspersão por plasma é a segunda categoria dos processos elétricos. Ela pode ser subdividida nos processos de plasma de arco não transferido e plasma de arco transferido.

No processo de plasma de arco não-transferido uma fonte de corrente contínua alimenta o sistema de controle, o qual capta gases de plasma e arraste, induzem até o alimentador de pó e por fim direcionam até a tocha de plasma. O sistema é refrigerado por água. (PAWLOWSKI,2008)

É durante o aquecimento que o plasma surge da ionização do gás. O fluxo de deposição do pó no substrato é dado em alta velocidade e também é possível afirmar que o processo fornece energia térmica de alta densidade. (FAUCHAIS,2014)

Alguns parâmetros importantes são a velocidade, temperatura e calor do jato do plasma e eles são controlados pelo tipo de bocal, corrente do arco, razão de mistura dos gases e taxa de fluxo do gás. De forma geral, os gases utilizados no processo são argônio, nitrogênio, hélio e hidrogênio. (PAWLOWSKI,2008)

Neste contexto, existem algumas variações do processo de aspersão por arco plasma não transferido, são os chamados de “Aspersão Térmica por Atmosfera Controlada”. Neste caso, devido a finalidade da aplicação, se faz uso de uma atmosfera controlada, para os mesmos princípios do arco plasma não transferido. Dentro destas técnicas está a chamada “Aspersão por Plasma no Vácuo” ou também conhecida por “Aspersão por Baixa Pressão”. (PAWLOWSKI,2008)

Há também, como mencionado anteriormente, a aspersão por arco transferido. Nesta técnica, o aquecimento e fusão da superfície do substrato pode levar a mudanças da microestrutura do mesmo, entretanto, o processo possui elevada taxa de deposição e é mais simples comparado as demais técnicas, uma vez que utiliza quantidade menor de energia e se aproxima mais aos processos de soldagem.

2.2.3 Aspersão Térmica por Chama

Os processos de aspersão por combustão englobam a segunda categoria de métodos de aspersão térmica. Ele pode ser subdividido em chama convencional ou oxicomustível de alta velocidade.

Primeiramente, sobre o processo de chama convencional, sua principal característica é utilizar um gás combustível como aquecimento para fusão. Há

diferenças na nomenclatura a depender do tipo de alimentação do Sistema. Nos casos em que o combustível está na forma de pó, temos a denominação de “Aspersão por chama de pó”, mas caso o combustível esteja na forma de arame é denominado “Aspersão por chama de arame”. (PAWLOWSKI,2008)

O equipamento se diferente em sua construção no se refere a alimentação: pó, arame ou vareta. No caso da alimentação por arame ou vareta, o aparato possui bocal de gás e capa de ar, diferente do dispositivo por pó, que adiciona pó ao combustível e é ligado diretamente ao bico da tocha. No sistema por pó, também há a utilização de um reservatório para armazenamento do pó. (PAWLOWSKI,2008)

Além disso, para alimentação na forma de arames há rolos direcionadores que guiam o arame até o bocal apropriado onde ocorre a fusão pela chama de gás. Estes rolos são controlados de forma elétrica, onde na maioria das vezes há controle de velocidade. Desse modo, a taxa de alimentação pode variar de 80 a 650 g/min. Para o uso de varetas cerâmicas, pode haver mais adaptações do método de aspersão, para melhor adequar as características do ponto de fusão e condutividade térmica da cerâmica. (PAWLOWSKI,2008)

De um modo geral, os processos de aspersão térmica por chama possuem pouca adesão e coesão e acabam apresentando maior porosidade quando comparado a outros métodos de revestimento.

2.2.4 Aspersão Térmica por Chama de Alta Velocidade

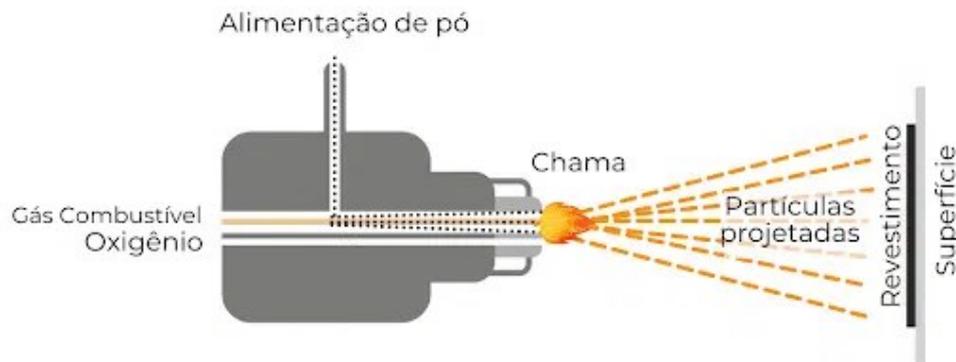
A aspersão térmica por alta velocidade é utilizada na metodologia deste trabalho. É comumente chamada de HVOF devido a sua origem do nome inglês (High Velocity Oxygen Fuel), podendo ser traduzida como Aspersão Oxicombustível de Alta Velocidade. (LIMA,2007)

Os primeiros trabalhos sobre a aspersão por HVOF foram datados entre a década de 70 e 80, e como o nome deduz, sua capacidade de velocidade é maior do que comparado aos demais processos. (FAUCHAIS,2014)

O princípio de funcionamento do HVOF permite que sua aplicação seja destinada a casos onde se deseja maiores resultados em resistência ao desgaste, devido a técnica não favorecer o superaquecimento, o que geralmente eleva tensões residuais. Entretanto, a técnica não somente se restringe a essa vantagem, como também tem sido atualmente aplicada para demais utilizações. (PAWLOWSKI,2008)

A técnica consiste em utilizar um gás combustível para ser queimado com oxigênio a alta pressão, gerando um jato a alta velocidade. Dentre os combustíveis empregados, os mais recorrentes são propano, propileno e hidrogênio que são misturados com oxigênio e queimados em uma faixa de velocidade entre 1500 a 2000 m/s. No processo também é utilizado pó, o qual é alimentado na tocha de forma posterior a entrada dos gases. O pó neste processo possui partículas fundidas de forma parcial que chegam a uma velocidade entre 550 a 800 m/s. A figura 1 ilustra esquematicamente o processo de deposição por HVOF.

Figura 1 – Aspersão Térmica por Chama de Alta Velocidade



Fonte: Sulcromo (2022)

O processo de aspersão por alta velocidade possui uma temperatura da tocha tal que não viabiliza o uso da técnica para cerâmicas, no entanto, a grande vantagem do emprego de altas velocidades, é garantir que mesmo com partículas semi-fundidas se possa obter um bom revestimento. (PAWLOWSKI,2008)

Os principais parâmetros e características do processo segundo o autor são: tamanho de partículas usualmente de 5 a 45 μm , taxa de alimentação de 20 a 80 g/min e distância de aspersão variando de 120 a 300mm. A maioria dos pós são de carbonetos de tungstênio e cromo e demais parâmetros se assemelham ao processo de aspersão por detonação (D-Gun), com exceção da perda queima contínua no processo HVOF. (LIMA,2007)

Neste contexto, há também alguns parâmetros do jato que podem influenciar na qualidade dos revestimentos. Um deles é a pressão na câmara de combustível que varia de 1MPa até 4MPa nas aplicações mais comuns, além do perfil do bocal sendo utilizado que influencia no padrão de fluxo de chama e velocidade e por fim a estequiometria da mistura de combustível mais oxigênio.

As propriedades dos revestimentos por HVOF possuem resistência a tração de até 90Mpa e a porosidade é menor do que 1%. A espessura pode variar na faixa de 100-300 μm , ou seja, os revestimentos aspergidos por HVOF oferecem boas propriedades. (PAWLOWSKI,2008)

Existem algumas variações do método de aspersão térmica por alta velocidade. Essas variações surgiram para aprimorar o processo, o que em alguns casos resultou em melhores resultados contra a corrosão e também outros métodos de aspersão. O HVOF, por exemplo, é um resultado de aprimoramentos, no qual ao invés da utilização de oxigênio, é utilizado ar a fim de reduções significativas no custo. Além do HVOF, o HVAF, o HVIF e HFPD também surgiram a partir dos conceitos do HVOF, ou seja, o constante aperfeiçoamento da técnica resulta em menores índices de porosidade e menores quantidades de óxidos, que levam a corrosão. (PAWLOWSKI,2008)

2.2.5 Aspersão Térmica por Cold Spray

O processo de aspersão térmica por Cold Spray pode também ser chamado de "Aspersão a Frio". Como o nome se refere, o processo utiliza de baixas temperaturas na expansão do gás e vapor das partículas. A temperatura nesse caso pode variar de 0 a 800°C. (PAWLOWSKI,2008)

A velocidade no processo de deposição por Cold Spray, varia de 300 a 1200 m/s e os principais gases utilizados são hidrogênio, nitrogênio e hélio. Outro parâmetro do processo é a taxa de alimentação de pó média de até 14Kg/h embora seja usual a utilização entre 3 a 5 Kg/h. (PAWLOWSKI,2008)

O equipamento do processo por cold spray possui uma diferenciação dos demais por possuir uma etapa de pré-aquecimento do gás. O suprimento do gás é direcionado a alta pressão para um módulo de controle de gás, o qual se ramifica para um aquecedor de gás enquanto o gás de arraste para o alimentador de pó. O resultado se unifica novamente no bico supersônico, que por sua vez, realiza pela tocha a aspersão. Durante o processo, há um sistema computacional de aquisição de dados e de controle. (PAWLOWSKI,2008)

Devido as características e adaptações do sistema para as temperaturas mais baixas, há possibilidade nesse processo de se utilizar "polímeros ou compósitos com mais de 50% de materiais dúcteis com metais frágeis ou cerâmicas". (LIMA,2007)

As principais vantagens do sistema de aspersão por cold-spray estão na utilização de revestimentos mais espessos, com baixa quantidade de óxidos e alta dureza.

2.2.6 Aspersão Térmica por D-Gun

A aspersão térmica por detonação ou “Aspersão Térmica por D-Gun” é a segunda categoria de métodos de aspersão por combustão. Esse processo utiliza “a energia da explosão de misturas oxigênio-acetileno” para o aquecimento e deposição do pó no revestimento.

A detonação acontece por uma vela de ignição presente na tocha de aspersão após os gases serem misturados. As partículas então são aceleradas, aquecidas e expelidas pela tocha em velocidade de 760m/s. (LIMA,2007)

O processo é cíclico e produz altas temperaturas dentro da tocha de detonação. A temperatura pode chegar a 3315°C e cabe, portanto, um sistema de resfriamento para manter o substrato a temperaturas mais baixas. Para esse sistema de resfriamento é utilizado dióxido de carbono líquido, capaz de deixar o substrato a temperaturas menores de 150°C. (FRANEK,2009)

O resultado dos processos de detonação é um revestimento com boas propriedades de aderência, duro, denso e de espessura uniforme variando de 0,05 a 0,5mm. Os valores de resistência adesiva estão usualmente acima de 69MPa e o índice de porosidade dos revestimentos está abaixo de 2%, devido as altas velocidades empregadas, sendo considerado um valor relativamente bom. (LIMA,2007)

A utilização do processo D-Gun é comumente em aplicações onde se necessita resistência ao desgaste e à corrosão, e também onde se necessita utilizar materiais como metálicos, cerâmicos ou metal-cerâmicos.

2.3 Métodos de Caracterização de Revestimentos

A caracterização de revestimentos é importante desde a concepção de novos projetos como também na avaliação da qualidade em produções já existentes.

Na fase de pesquisa e desenvolvimento de novos projetos, o revestimento deve ser analisado de forma minuciosa para que atenda as especificações necessárias previstas, e, portanto, se utiliza de maiores recursos de análise.

2.3.1 Técnicas de Análise de Microestrutura

Uma das principais formas de avaliar os revestimentos termicamente aspergidos é analisando a sua microestrutura. A microestrutura pode fornecer dados como a composição química em escala micro e macro, morfologia e orientação dos grãos, defeitos e propriedades em diferentes profundidades de revestimentos.

Para a técnica de análise da microestrutura, o microscópio ótico pode trazer bons resultados de estudo. Ele é capaz de identificar diferentes fases, defeitos em geral, inclusões sólidas dentre demais características de partículas. Para diâmetros menores que 5nm, é possível também a aplicação da microscopia eletrônica de varredura. (PAWLOWSKI,2008)

2.3.1.1 Metalografia

A metalografia é uma técnica interessante para a aspensão térmica, pois consiste na utilização da microscopia ótica ou eletrônica de varredura a fim de identificar aspectos como espessura do revestimento, óxidos, porosidades, delaminação, partículas de contaminação, dentre outras características importantes na análise do revestimento e substrato. (PAWLOWSKI,2008)

A técnica requer preparo da amostra a ser analisada, com corte lixamento e polimento, e os resultados obtidos são de forma geral qualitativos, embora existam sistemas mais modernos capaz de captar dados quantitativos.

2.3.2 Técnicas de Análise Química

Dentre os métodos de análises químicas se destacam a Espectroscopia de Raios-X Dispersiva em Energia a qual fornece dados da composição química de materiais, detalhando seus elementos presentes e concentrações. Além dela, com melhor resolução há a Espectroscopia por Dispersão de Comprimento de Onda (comumente utilizada em microscopia eletrônica de varredura e microanálise), a Espectroscopia de Absorção Infra-Vermelha, Espectroscopia Raman, Espectroscopia de Fotoelétrons de Raio-X, Espectroscopia de Raio X Fluorescente, dentre outras técnicas. (PAWLOWSKI,2008)

2.3.3 Técnicas de Análise Cristalográfica

Além das análises químicas é possível também retirar informações de análises cristalográficas. As técnicas de cristalografia permitem a análise da fase presente na amostra, da textura dos grãos cristalizados e o grau de cristalização. Dentre as principais técnicas para cristalografia destacam-se a Difração por Área Seleccionada (SAD) e Difração por Raio-X (XRD). (PAWLOWSKI,2008)

2.3.4 Técnicas de Análise de Adesão

Em muitos casos, os revestimentos por aspersão térmica são utilizados para melhorar a resistência ao desgaste. O desgaste é um processo complexo que depende de alguns parâmetros.

Os parâmetros podem ser divididos em entrada, processo e saída. Os parâmetros de entrada são a carga, temperatura, tempo e velocidade. Parâmetros de processo são materiais, lubrificante (se utilizado), ambiente, geometria de contato, preparação da superfície e procedimento operacional. Por fim, os parâmetros de saída são a fricção, vibração, barulho e massa ou volume desgastado. (FRANEK,2009)

Portanto, existem técnicas de análise que complementam as informações sobre o revestimento. Uma dessas técnicas é a determinação da adesão. Com a verificação da adesão é possível garantir que as partes de menor resultado estejam dentro de um padrão aceitável e também verificar que as condições do processo obtiveram a resistência adequada. (FRANEK,2009)

As técnicas de ensaio de adesão mais satisfatórias são aquelas que permite reprodutibilidade, sendo de fácil execução e não dependendo do operador para obtenção de resultados. Além disso, na aspersão térmica é preciso também utilizar técnica que possa ser aplicada para diferentes espessuras e ampla faixa de resistências. (FAUCHAIS,2014)

Nessa conjuntura, uma técnica que se destaca é o ensaio de tração, por ser universalmente conhecido e relativamente de fácil acessibilidade. O ensaio de tração é redigido por normativas para preparo de amostras e execução de ensaios. Assim, para o ensaio de adesão em revestimentos aspergidos, existe a norma ASTM-C633-79, com revisão de 2001 a qual define procedimentos para o ensaio de resistência adesiva. Em termos gerais, a norma aplica um método de baixo custo, que utiliza corpos

de prova unidos por um adesivo epóxi que são tracionados até a sua separação. (LIMA,2007)

Outro ensaio utilizado para medição de resistência adesiva é o ensaio de arrancamento com fita ou *tape test*. Esse ensaio se difere dos demais por ser aplicado principalmente em revestimentos de aderência baixa ou média. A grande vantagem do método é que pode ser considerado como um ensaio não destrutivo e não há necessidade de produzir corpos de prova para realização do ensaio. A padronização deste ensaio é redigida pela norma ASTM-D3359-95. (LIMA,2007)

O ensaio de dobramento, por sua vez, também pode ser utilizado, sendo ele um ensaio destrutivo redigido pelas normas MIL-STD-2138 e Petrobrás N-2568. Nesse ensaio é também possível observar a formação de trincas, delaminação e descascamento se o corpo de prova não estiver de acordo. (PAWLOWSKI,2008)

Por fim, no que se refere aos testes de resistência adesiva, existem também ensaios de cisalhamento que não são normalizados e fornecem resultados qualitativos, sendo, portanto, menos empregados.

2.3.5 Técnicas de Análise de Dureza

Dentro dos ensaios de dureza existentes, é importante a característica única de cada método de ensaio. Cada método utiliza-se de propriedades diferentes e por isso, não é possível realizar comparação de maneira assertiva entre os resultados de uma técnica para outra. Dentro do contexto da aspensão térmica, o método de medição de dureza mais utilizado é o de indentação, também conhecido por penetração. (LIMA,2007)

No método de indentação é aplicada uma carga de valor conhecido e a marca feita na superfície é medida. A partir da interpretação destes resultados, cada método determina o valor de dureza. Na aspensão térmica, os valores de dureza nos revestimentos podem variar devido a diferença nas propriedades com relação a direção do substrato. Não é possível comparar propriedades do substrato com o revestimento, assim, só é viável uma comparação entre revestimentos aspergidos do mesmo modo. (PAWLOWSKI,2008)

O ensaio de microdureza Vickers é um exemplo amplamente utilizado na medição de dureza. Ele utiliza uma escala feita pela carga aplicada e pela área de indentação. Os equipamentos são redigidos pela norma ASTM E-384-89. Para utilizar esse ensaio as amostras devem ser previamente preparadas através de corte,

lixamento e polimento e o maior número de indentações favorece os resultados dos ensaios de revestimentos, uma vez que os resultados podem variar muito ao longo do revestimento. (LIMA,2007)

Segundo os autores Carlos Roberto Camello e Roseana Trevisan, o ideal para garantir que o substrato não interfere no revestimento, é utilizar uma espessura de revestimento no mínimo dez vezes maior que a profundidade de indentação.

É possível também avaliar a macrodureza de revestimentos, esta usualmente medida pela dureza Rockwell. Este método é redigido pela norma ASTM E-18-94 e é também importante garantir que não haja interferência nos resultados devido a espessura do revestimento. (LIMA,2007)

2.3.6 Ensaios Não-Destrutivos

É possível também a utilização de técnicas de ensaios não destrutivos para avaliação de aspectos visuais, rugosidade e espessuras. Segundo os autores Carlos Camello e Roseana Trevisan o ensaio por ultrassom pode ser utilizado para detecção de porosidade pela evidência de que “no instante em que a porosidade se torna maior, a velocidade da propagação diminui”. Além disso, os autores também estabelecem que outros recursos podem ser utilizados como líquido penetrante, instrumentos de metrologia, dentre outros. (LIMA,2007)

2.4 Principais Revestimentos

Dentre os revestimentos utilizados para a aspensão térmica, alguns se destacam pelas suas propriedades e vantagens. Neste contexto, um material que se destaca em aplicações é o Cr₃C₂.

Segundo estudos do autor Gerard Barbezat (2006), o Cr₃C₂ é um material comumente utilizado em revestimentos, geralmente com a adição percentual de NiCr. A principal característica e vantagem destes revestimentos é a resistência a corrosão, além de maior resistência a temperatura em comparação com materiais de WC, que também são empregados com frequência. (BARBEZAT 2006)

Ademais, o autor também destaca as diferenças entre dois revestimentos utilizados neste trabalho: o Cr₃C₂ 25NiCr e WC₁₂CO, indicando que estudos sobre tais elementos aplicados a técnica de HVOF resultaram em amostras de 0.8% porosas para Cr₃C₂ 25NiCr e apenas 0.3% para WC₁₂CO. (BARBEZAT 2006)

Por fim, outro material de bastante interesse é a liga tribaloy, pelo seu campo de aplicação ser destinado a melhoria de resistência a abrasão. A liga é constituída por Cobalto, Cromo e Molibdênio, portanto, oferece também boas propriedades de resistência a corrosão. (SULCROMO,2022)

2.5 Aplicações de Revestimentos Aspergidos

As técnicas de aspersão térmica se desenvolveram com o passar dos anos no que se refere ao seu campo de aplicações. Continuamente se descobre mais informações e aplicações onde a técnica apresenta grande desempenho e resultados com economia de custo.

Dentre os setores da indústria que podem se beneficiar dos revestimentos aspergidos se destacam o setor automobilístico, aeroespacial/aeronáutico, siderúrgico, petroquímico, papel e celulose dentre outros.

Como mostra a pesquisa feita por Lech Pawlowski, o investimento na área de aspersão térmica tem crescido continuamente, apresentando 110 milhões de euros somente na China em 2004. (PAWLOWSKI,2008)

Dentre os exemplos citados pelo autor há no ramo aeroespacial a aplicação em motores aeronáuticos, trem de pouso e também revestimentos da câmara de empuxo de foguetes, neste último caso, os revestimentos são aplicados como forma de proteção da estrutura interna contra temperatura e fatores de risco provenientes da queima de combustível. (PAWLOWSKI,2008)

Além disso, na agricultura e indústria alimentar a aspersão também pode ser aplicada nas chamadas máquinas de parafuso duplo, amplamente usadas no setor. Na indústria automobilística, por sua vez, o emprego é maior em pistões, cilindros, anéis, eixos e válvulas como proteção ao desgaste, porém, a utilização da aspersão pode também envolver proteção contra corrosão, isolamento térmico e até mesmo revestimentos para fins estéticos. (PAWLOWSKI,2008)

Na indústria cerâmica a aspersão pode ser utilizada com o propósito de melhorar as propriedades de proteção de temperaturas elevadas, embora segundo o autor Pawlowski o segmento tenha avançado de maneira lenta para o uso da aspersão. (PAWLOWSKI,2008)

Por fim, a aspersão térmica também pode beneficiar a indústria química, petrolífera, a engenharia civil, a indústria eletrônica e também ser utilizada para aplicações decorativas. São muitas as aplicações da aspersão térmica, por isso a

importância do conhecimento sobre o tema e sobre as práticas em constante desenvolvimento e abrangimento de novas aplicações.

2.6 Tipos de Desgaste

Para a compreensão dos fenômenos de desgaste é importante levar em consideração uma série de fatores. Dentre estes fatores se destacam a origem, ou forma de ocorrência do mesmo. Na literatura é possível encontrar diversas denominações ou “tipos” de desgaste. Os principais são o desgaste por abrasão, adesão, fadiga, corrosão, erosão, cavitação e impacto.

O desgaste abrasivo “ocorre quando partículas duras deslizam ou são forçadas contra uma superfície em relação à qual estão em movimento, provocando deslocamento ou remoção de material”. (LIMA,2007)

Por sua vez, o desgaste adesivo ocorre quando “duas superfícies em contato por atrito sofrem deformação plástica localizada, ocorrendo uma soldagem entre as asperezas”. (LIMA,2007)

O desgaste erosivo “resulta da colisão de partículas sólidas ou gotas de líquidos carregadas por um fluido contra uma superfície”. (LIMA,2007)

O desgaste por erosão é proveniente de partículas em alta velocidade sólidas ou líquidas que entram em contato com certa superfície causando nela desgaste. (LIMA,2007)

Comum em sistemas de fluidos, o desgaste por cavitação é gerado do impacto de bolhas de vapor de alta velocidade em superfícies de fluidos em movimento. (LIMA,2007)

O desgaste por impacto ocorre devido a cargas de impacto aplicadas a uma superfície. Cargas de impacto no geral são forças repentinas e de grande intensidade, causando desgaste. (LIMA,2007)

Através da análise abrangente da literatura, é possível estabelecer a importância da aspersão térmica em diferentes contextos industriais, tão quanto seus benefícios quanto ao aprimoramento de propriedades de resistência ao desgaste, os tipos de aspersões e por fim o mecanismo de desgaste.

A aspersão térmica se mostra uma técnica promissora, capaz de avançar os métodos de seleção de materiais atuais e a engenharia como um todo.

3 METODOLOGIA

A pesquisa tem caráter experimental e o objetivo é avaliar a resistência ao desgaste de seis composições de revestimentos obtidos pela técnica de Aspersão Térmica por HVOF. Para tal, se faz necessário selecionar e preparar as amostras para os ensaios mecânicos selecionados, obtendo resultados para análise, estudo e conclusões sobre os revestimentos e a técnica.

3.1 Revestimentos Selecionados

Os revestimentos selecionados para estudo foram:

- Cr_3C_2 7NiCr;
- Cr_3C_2 10NiCr;
- Cr_3C_2 25NiCr;
- WC12CO;
- WC10Co4Cr
- Tribaloy;

As deposições realizadas pelo processo HVOF foram realizadas nas instalações da empresa Revesteel situada no município de Pinhais (PR). Foram utilizadas chapas de aço baixo carbono (SAE 1020) como substrato com dimensões de, aproximadamente, 50mm de largura por 200mm de comprimento com espessura de 4,5mm. Para garantir que a camada depositada tivesse espessura homogênea foi utilizado um sistema de fixação de amostras rotativo em conjunto com um sistema de movimento oscilatório da tocha na direção longitudinal do eixo de rotação. Os parâmetros de deposição para todas as amostras são listados na Tabela 1.

O substrato de aço SAE 1020 foi utilizado devido as suas diversas aplicações e pelo fato de ser amplamente encontrado comercialmente.

Tabela 1 - Parâmetros utilizados no processo de deposição HVOF.

Parâmetros	Amostras
Consumo de Combustível (m ³ /h)	3,00
Vazão de Oxidante (m ³ /h)	15,00
Razão Combustível/Gás de Arraste	0,20
Fluxo Total de Gases (m ³ /h)	18,00
Tipo de Pistola	SulzerMetco DJ2700
Combustível	Propano (C ₃ H ₈)
Pressão do Combustível (MPa)	0,552
Oxidante	Oxigênio (O ₂)
Pressão de Oxidante (MPa)	0,965
Gás de Arraste	Ar
Pressão do Gás de arraste (MPa)	0,827
Vazão de Gás de Arraste (m ³ /h)	21,00
Distância entre peça e bocal (mm)	250
Taxa de alimentação de pó (g/min)	40

Fonte: Autoria Própria (2023)

3.2 Análise Metalográfica

Para a análise por metalografia se faz necessário o preparo das amostras utilizando corte, lixamento e polimento.

3.2.1 Preparação das Amostras

Para o corte das amostras foi utilizado a máquina policorte Buehler ISOMET 4000 e em seguida realizado o embutimento de cada amostra em baquelite na embutidora SimpliMet XPS1 Buehler.

Para o lixamento foi utilizado discos de granulometria de 220 até 1200 mesh e para polimento suspensão de diamante 3 µm a uma carga constante na lixadeira politriz.

A metalografia foi realizada no laboratório multiusuário C2MMA de materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) Campus Ponta Grossa. As figuras 2 e 3 mostram os equipamentos utilizados para preparo das amostras.

Figura 2 – Lixadeira Politriz



Fonte: Aatoria Própria (2023)

Figura 3 – Amostras Preparadas para Ensaio



Fonte: Aatoria Própria (2023)

3.3 Ensaio de Dureza Vickers

Para o ensaio de dureza Vickers, foi utilizado o equipamento Shimadzu HMV-G20 Series, conforme mostra a figura 4, seguindo a norma ASTM E384, (2017) – Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials, com valor de pré carga de 300HV.

Figura 4 – Durômetro

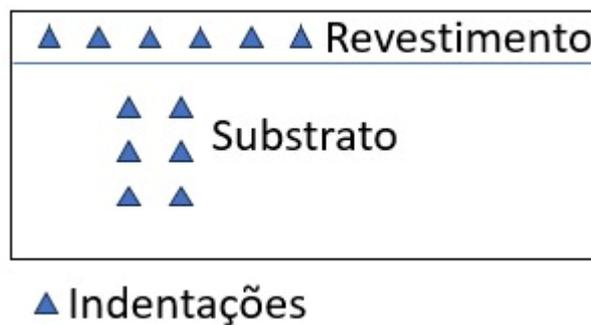


Fonte: Autoria Própria (2023)

Para o ensaio de dureza foram coletados um total de 12 medições em cada amostra, sendo 6 no revestimento e 6 no substrato, variando uma distância fixa de 90 μ m.

A distribuição das indentações pode ser observada na representação da figura 5:

Figura 5 – Indentações



Fonte: Autoria Própria (2023)

3.4 Ensaio de Desgaste

Para o ensaio de desgaste foi medido a rugosidade superficial inicial de cada amostra através do perfilômetro óptico 3D sem contato da marca *Taylor Hobson modelo CCI Lite* (figura 6) e também o peso inicial de cada amostra.

Figura 6 – Perfilômetro



Fonte: Autoria Própria (2023)

As amostras foram submetidas a velocidade constante na lixadeira poltriz em parâmetros controlados. Para cada amostra foi realizado troca de disco, para manter a uniformidade dos parâmetros e garantir resultados mais confiáveis.

O preparo das amostras para o ensaio de desgaste consiste no corte de 19cm² de cada amostra e a colagem da amostra cortada em um suporte cilíndrico de alumínio, de dimensões coerentes com a lixadeira. Para a colagem foi utilizado cera de abelha, de propriedades suficientes para manter a fixação desejada.

Os tempos estabelecidos para o ensaio foram de 10 minutos totais, divididos em 5 seções de 2 minutos cada. Entre o tempo de cada seção, as amostras foram limpas com álcool e submetidas ao banho ultrassônico por 3 minutos. Posteriormente, foi realizada secagem com secador na potência máxima por exatos 1 minuto. Os tempos foram determinados por critérios de padronização.

O tempo de secagem foi definido para que as medições de perda de massa não fossem alteradas devido a água.

Durante o ensaio os parâmetros configurados na poltriz foram os seguintes:

- Carga constante de 20N;

- Velocidade de 150 rpm, sentido contra rotativo;
- Sem utilização de água;
- Uma lixa para cada amostra, granulometria 320;

Os resultados da análise são obtidos pelas medições de perda de massa com o tempo decorrido, dessa forma é possível analisar e comparar os resultados de desgaste para cada tipo de revestimento. A perda de massa acumulada é calculada pela diferença entre a massa inicial e final do intervalo de tempo, enquanto a perda por volume foi definida pela densidade de cada revestimento proporcionalmente a sua composição.

Na figura 7, temos um exemplo de uma das amostras cortadas e coladas no suporte de alumínio, preparada para realização do ensaio.

Figura 7 – Ensaio de Desgaste



Fonte: Autoria Própria (2023)

Na figura 8, o equipamento para banho ultrassônico utilizado.

Figura 8 – Banho Ultrassônico



Fonte: Autoria Própria (2023)

3.5 Microscopia Óptica

Para a análise microestrutural se faz uso do microscópio Zeiss modelo A.2M pertencente ao laboratório C2MMA. Através do equipamento é possível obter análises qualitativas como a presença de porosidade óxidos ou partículas não fundidas. Na figura 9 a imagem do microscópio utilizado.

Figura 9 – Microscópio



Fonte: Autoria Própria (2023)

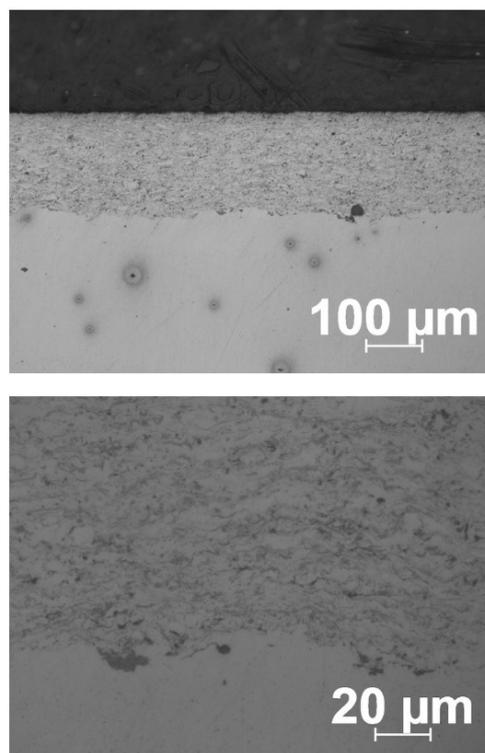
Após a utilização de cada método de análise, pode-se obter resultados comparativos entre as amostras e deste modo chegar a conclusões sobre o comportamento das amostras revestidas pela técnica de aspersão térmica, desse modo, seguramente, evidenciando a efetividade do método.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resultados Metalografia

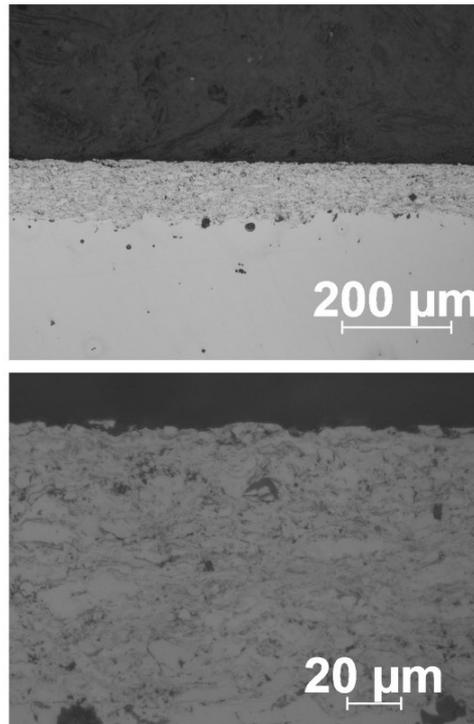
As figuras 10-15 revelam os revestimentos depositados por aspersão térmica antes da realização do ensaio de desgaste. Pode-se observar em cada imagem a espessura e detalhe do revestimento nas amostras. Neste contexto, o WC10Co4Cr apresentou menor espessura comparado aos demais, enquanto o Cr3C2 25NiCr e Tribaloy possuem as maiores espessuras de revestimento.

Figura 10 – Resultados Metalografia Cr3C2 7NiCr



Fonte: Autoria Própria (2024)

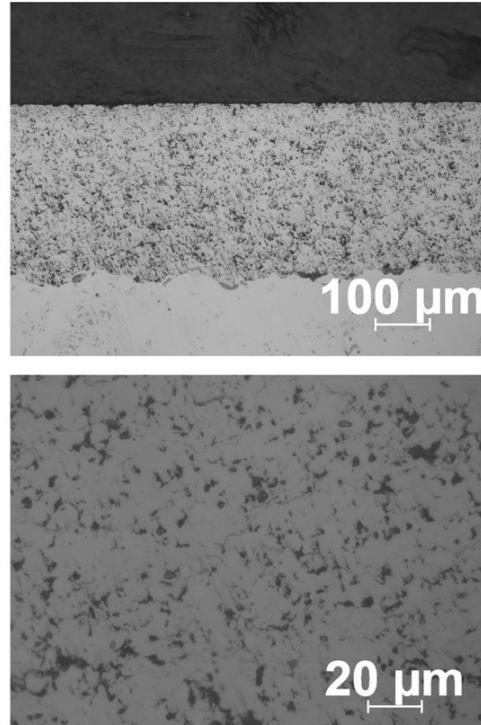
Pode-se observar pelas figuras 10-12 que as amostras que possuem Cr3C2 em sua composição obtiveram aspectos e espessuras diferentes com a variação da composição de NiCr. Enquanto a espessura da amostra de Cr3C2 25NiCr possui o maior valor em módulo, o revestimento de Cr3C2 10NiCr possui o segundo menor valor de espessura mensurado.

Figura 11 – Resultados Metalografia Cr₃C₂ 10NiCr

Fonte: Autoria Própria (2024)

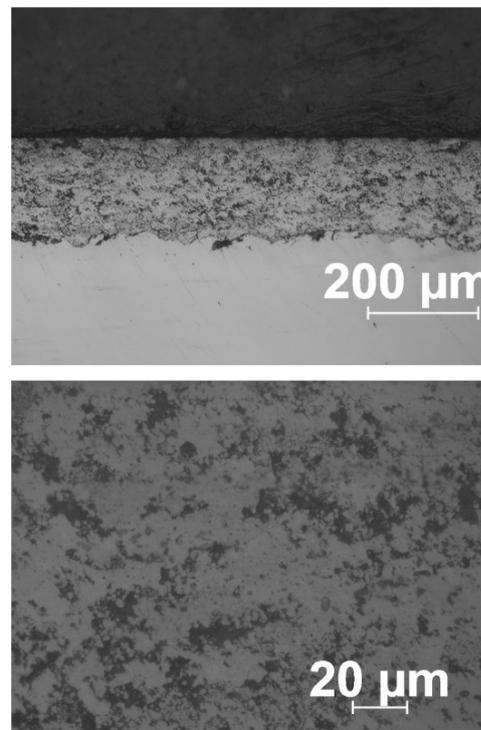
Embora os parâmetros da deposição por aspersion térmica HVOF serem os mesmos para todos os revestimentos, obtiveram-se variações quanto a porosidade e espessuras destes revestimentos, como mostra as figuras pela metalografia. O processo de aspersion pode proporcionar estas variações de espessura, enquanto a composição do material possui maior influência sobre as características de porosidade de cada amostra. A porosidade também é um fator que deve ser levado em conta para análise dos resultados, quanto maior presença de poros, menos eficaz deve ser o revestimento.

Figura 12 – Resultados Metalografia Cr3C2 25NiCr



Fonte: Autoria Própria (2024)

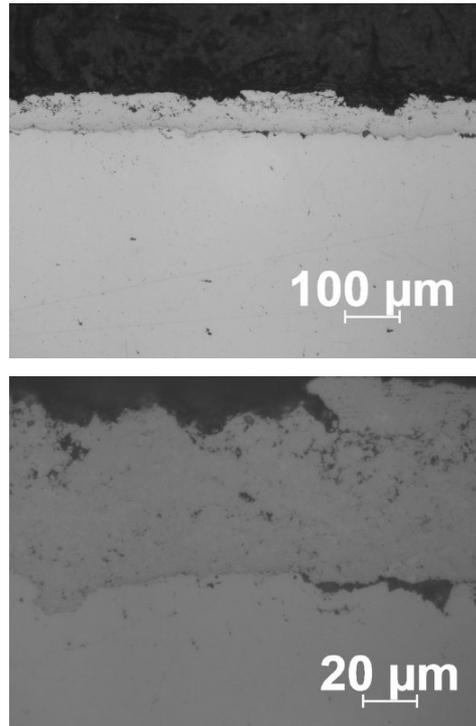
Figura 13 – Resultados Metalografia WC12CO



Fonte: Autoria Própria (2024)

Comparado aos demais revestimentos, o WC10Co4Cr possui o menor valor de espessura. A figura 14 ilustra este resultado.

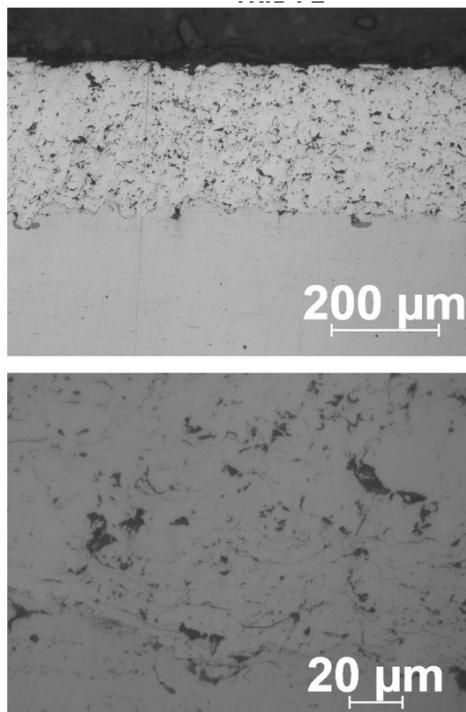
Figura 14 – Resultados Metalografia WC10Co4Cr



Fonte: Autoria Própria (2024)

A figura 15 mostra o resultado da metalografia da liga Tribaloy, a qual apresentou valores altos de espessura comparado as outras amostras, e também porosidade menor com relação a outros revestimentos.

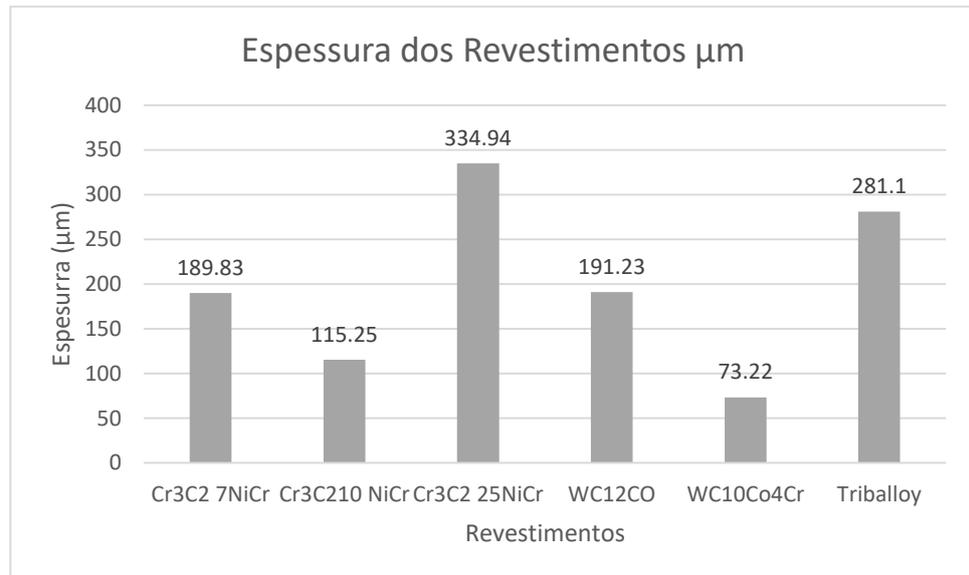
Figura 15 – Resultados Metalografia Tribaloy



Fonte: Autoria Própria (2024)

Por fim, o gráfico 1 evidencia que as maiores espessuras de revestimentos estavam presentes nas amostras de Cr3C2 25NiCr com 334.94 μm e Triballoy com 281.1 μm . Os revestimentos menos espessos foram Wc10Co4Cr com apenas 73.22 μm e Cr3C210NiCr com 115.25 μm .

Gráfico 1 – Resultados Espessura dos Revestimentos



Fonte: Autoria Própria (2024)

4.2 Ensaio de Dureza

Os resultados do ensaio de dureza obtidos são representados da tabela 2 a tabela 7, de forma a conter todas as medições realizadas, sua média e desvio apresentados para cada amostra. O resultado para a base metálica refere-se ao substrato de metal, enquanto o revestimento se refere ao especificado em cada parte da imagem.

Tabela 2 – Resultados Ensaio de Dureza Cr3C2 7NiCr

(continua)

Cr3C2 7NiCr			
Resultado Revestimento (HV):			
800	Média	811.1667	
816	Desvio	39.14801	
795			
879			
817			
760			
Resultado Base Metálica (HV)			
168	Média	169.3333	
170	Desvio	5.202563	

179

166

164

Fonte: Aatoria Própria (2024)

Tabela 3 – Resultados Ensaio de Dureza Cr3C210 NiCr

Cr3C210 NiCr

Resultado Revestimento
(HV):

730 Média 758.6667

764 Desvio 21.16286

775

762

784

737

Resultado Base Metálica
(HV)

158 Média 151.5

146 Desvio 4.086563

150

154

150

151

Fonte: Aatoria Própria (2024)

Tabela 4 – Resultados Ensaio de Dureza Cr3C2 25NiCr

Cr3C2 25NiCr

Resultado Revestimento
(HV):

625 Média 631.5

715 Desvio 49.51262

594

600

665

590

Resultado Base Metálica
(HV)

154 Média 158

151 Desvio 4.64758

162

163

159

159

Fonte: Aatoria Própria (2024)

Dentre as amostras contendo Cr3C2 a composição que obteve-se maiores valores de dureza é a de Cr3C2 7NiCr.

Tabela 5 – Resultados Ensaio de Dureza WC12CO

WC12CO			
Resultado Revestimento (HV):			
409	Média	520.8333	
369	Desvio	176.0823	
549			
613			
369			
816			
Resultado Base Metálica (HV)			
147	Média	146.1667	
150	Desvio	4.070217	
144			
148			
139			
149			

Fonte: Autoria Própria (2024)

Tabela 6 – Resultados Ensaio de Dureza Wc10Co4Cr

WC10Co4Cr			
Resultado Revestimento (HV):			
1201	Média	832	
741	Desvio	222.7968	
706			
737			
607			
1000			
Resultado Base Metálica (HV)			
145	Média	140.3333	
133	Desvio	6.314006	
150			
140			
139			
135			

Fonte: Autoria Própria (2024)

Tabela 7 – Resultados Ensaio de Dureza Tribaloy

Tribaloy			
Resultado Revestimento(HV):			
780	Média	733.6667	
711	Desvio	32.20352	
700			
735			

(continua)

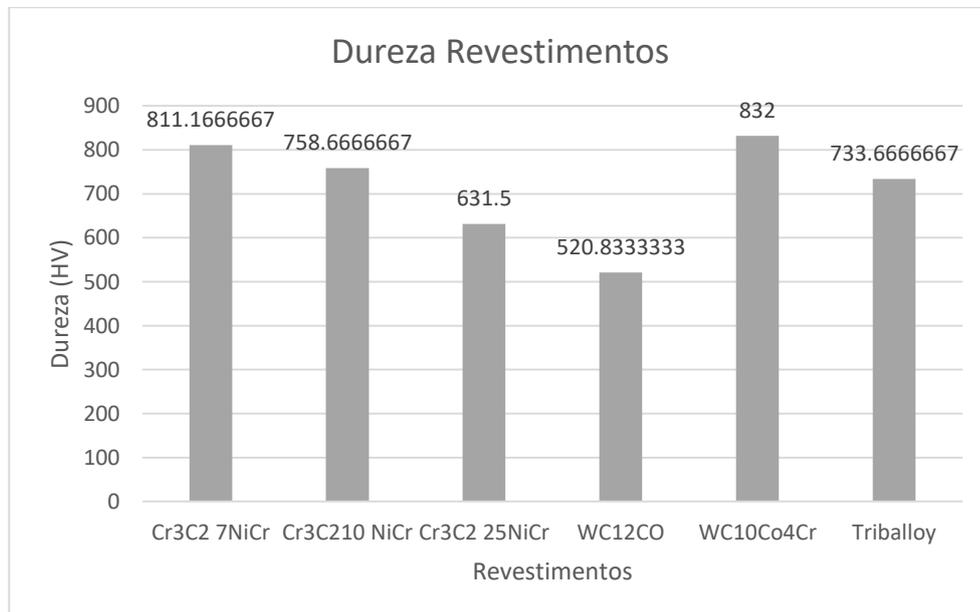
	764		
	712		
Resultado Base Metálica (HV)	184 Média	177.1667	
	167 Desvio	15.25014	
	174		
	205		
	167		
	166		

Fonte: Autoria Própria (2024)

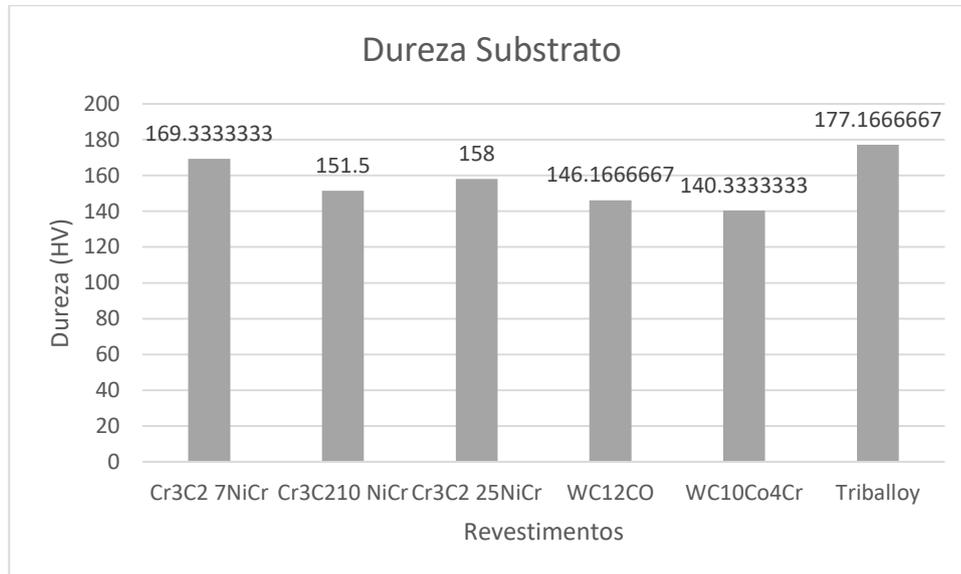
A maior média de dureza do revestimento encontra-se no revestimento de Wc10Co4Cr, seguida pelo Cr3C2 7NiCr. Enquanto as maiores médias de dureza do substrato metálico foram do revestimento de Triballoy e Cr3C2 7NiCr.

Os resultados de dureza mostram a mudança significativa da resistência com relação ao metal base, mudando consideravelmente suas propriedades mecânicas com relação a superfície (revestimento).

Gráfico 2 – Resultados Dureza dos Revestimentos



Fonte: Autoria Própria (2024)

Gráfico 3 – Resultados Dureza do Substrato

Fonte: Autoria Própria (2024)

4.3 Ensaio de desgaste

A tabela 8 até a tabela 13 contém todos os resultados das medições de massa obtidos pela balança de precisão. Estes dados são as fontes de comparação nos gráficos 4 e 5.

Tabela 8 – Resultados Ensaio de Desgaste Cr3C2 7NiCr

(continua)

Cr3C2 7NiCr			
Massa(g)			
Inicial	39.1505 39.1511 39.1514	Média	39.151
2min	39.1467 39.144 39.1441	Média	39.14493
4min	39.1348 39.1344 39.1348	Média	39.13467

6min	39.1326 39.1327 39.1326	Média	39.13263
8min	39.1303 39.1304 39.1306	Média	39.13043
10min	39.1295 39.1295 39.1298	Média	39.1296

Fonte: Autoria Própria (2024)

Tabela 9 – Resultados Ensaio de Desgaste Cr3C2 10 NiCr

(continua)

Cr3C210 NiCr			
Massa(g) Inicial	41.2188 41.2187 41.2186	Média	41.2187
2min	41.2085 41.2084 41.2086	Média	41.2085
4min	41.207 41.207 41.2071	Média	41.20703
6min	41.2059 41.2053 41.2057	Média	41.20563
8min	41.2037 41.2035 41.204	Média	41.20373
10min	41.2017 41.2019 41.2021	Média	41.2019

Fonte: Autoria Própria (2024)

Tabela 10 – Resultados Ensaio de Desgaste Cr3C2 25NiCr

Cr3C2 25NiCr			
Massa(g) Inicial	42.9506	Média	42.9506
	42.9507		
	42.9505		
2min	42.9376	Média	42.93773
	42.9379		
	42.9377		
4min	42.9356	Média	42.93533
	42.9352		
	42.9352		
6min	42.9342	Média	42.93433
	42.9338		
	42.935		
8min	42.9335	Média	42.93353
	42.9334		
	42.9337		
10min	42.9327	Média	42.9327
	42.9326		
	42.9328		

Fonte: Autoria Própria (2024)

Tabela 11 – Resultados Ensaio de Desgaste WC12CO

(continua)

WC12CO			
Massa(g) Inicial	44.5968	Média	44.5968
	44.5968		
	44.5968		
2min	44.595	Média	44.59567
	44.5952		
	44.5968		
4min	44.5932	Média	44.5932
	44.5932		
	44.5932		

6min	44.5916 44.5915 44.5917	Média	44.5916
8min	44.5887 44.5886 44.5888	Média	44.5887
10min	44.5866 44.5867 44.5866	Média	44.58663

Fonte: Aatoria Própria (2024)

Tabela 12 – Resultados Ensaio de Desgaste Wc10Co4Cr

Wc10Co4Cr			
Massa(g) Inicial	43.2223 43.222 43.2221	Média	43.22213
2min	43.2205 43.2206 43.2209	Média	43.22067
4min	43.2191 43.2191 43.2193	Média	43.21917
6min	43.2184 43.2186 43.2194	Média	43.2188
8min	43.2169 43.2172 43.2172	Média	43.2171
10min	43.2159 43.2169 43.2161	Média	43.2163

Fonte: Aatoria Própria (2024)

Tabela 13 – Resultados Ensaio de Desgaste Tribaloy

Tribaloy			
Massa(g)			
Inicial	43.1246 43.1246 43.1244	Média	43.12453
2min	43.1229 43.1231 43.1231	Média	43.12303
4min	43.1225 43.1228 43.1229	Média	43.12273
6min	43.122 43.1221 43.1223	Média	43.12213
8min	43.122 43.1217 43.1218	Média	43.12183
10min	43.1214 43.1214 43.1215	Média	43.12143

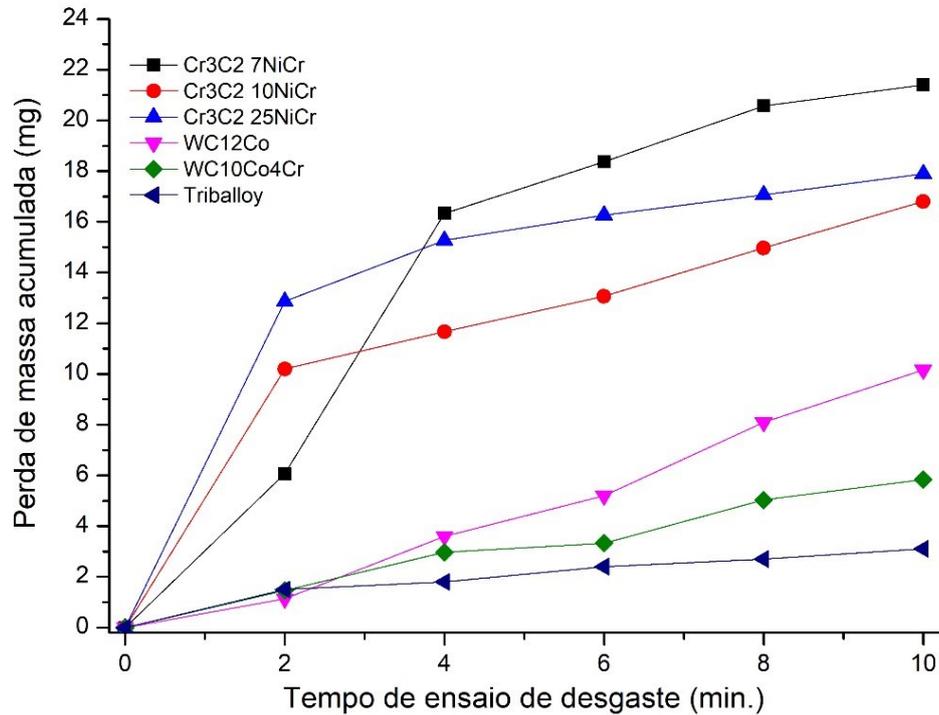
Fonte: Autoria Própria (2024)

A partir dos dados evidenciados nas tabelas, obteve-se o gráfico 4, que representa a perda de massa acumulada pelo tempo de ensaio de desgaste. Neste gráfico considera-se a diferença de variação de massa inicial pela massa no tempo de ensaio.

A análise do gráfico mostra que a amostra mais resistente a perda de massa foi a revestida por Tribaloy, em sequência Wc10Co4Cr. Em contrapartida, as amostras que mais perderam massa foram Cr3C2 7NiCr e Cr3C2 25NiCr.

A amostra que teve maior perda de massa no início do ensaio foi a de Cr3C2 25NiCr que apresentava rugosidade RA de 0.0605 no início do ensaio e RA 0.122 após dois minutos.

Gráfico 4 – Resultados Perda de Massa Acumulada



Fonte: Autoria Própria (2024)

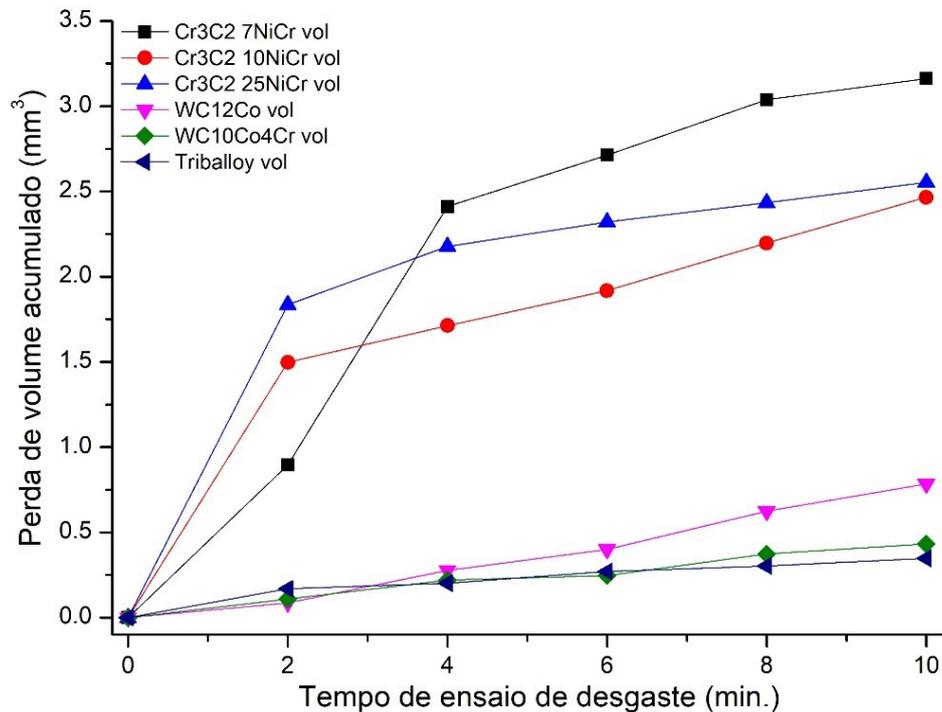
O gráfico 5 representa a perda de volume acumulado, permitindo a comparação entre os revestimentos, obtida a partir da densidade dos componentes do revestimento de acordo com a ponderação da proporção de cada elemento na amostra. Para o NiCr a densidade é 8,0 g/mm³, Cr3C2 de 7,0 g/mm³, WC 15.637g/mm³ e Co 8.97g/mm³. Os resultados das densidades são apresentados na tabela 14.

Tabela 14 – Dados de Densidade dos Revestimentos

Revestimento	Densidade g/mm ³
Cr3C2 7NiCr	6.77
Cr3C2 10NiCr	6.81
Cr3C2 25NiCr	7
WC12Co	12.98
WC10Co4Cr	13.05
Triballoy	8.9

Fonte: Autoria Própria (2024)

Gráfico 5 – Resultados Perda de Volume Acumulado



Fonte: Autorial Própria (2024)

Com relação a perda de volume acumulado, se pode observar que as amostras de Triballoy e WC10Co4Cr foram as que mais resistiram a perda de massa e obtiveram perda de volume semelhante tanto em módulo quando comportamento ao longo do tempo de ensaio.

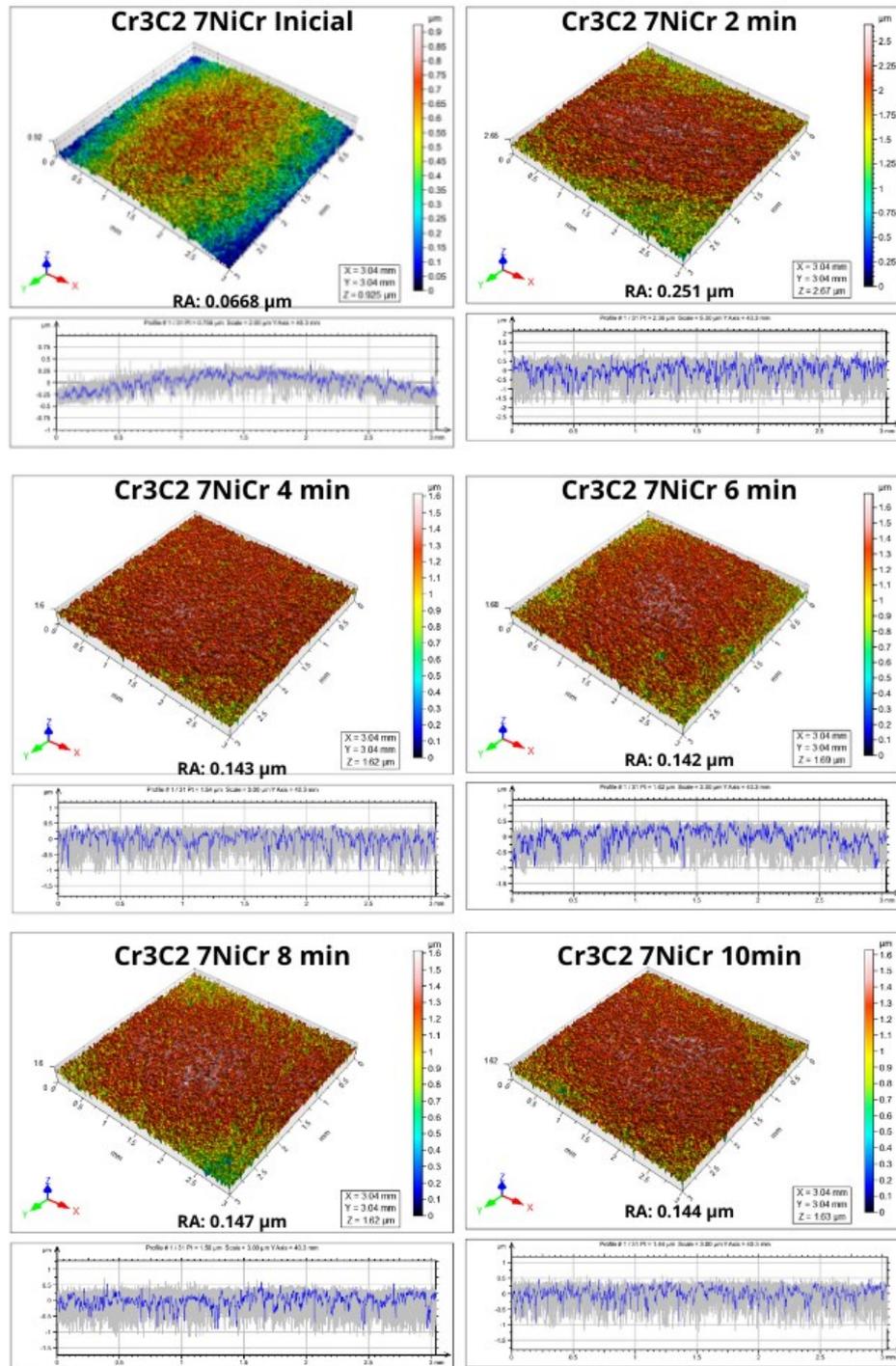
A amostra que teve maior perda de volume foi a amostra de Cr3C2 7NiCr, que foi a amostra com maior diferença de rugosidade no parâmetro RA, nos primeiros minutos de ensaio.

As maiores perdas de massa ocorreram nos dois primeiros minutos de ensaio, possivelmente, a granulometria da lixa utilizada proporcionou menor de perda de massa devido a sua dureza.

4.4 Resultados de Rugosidade

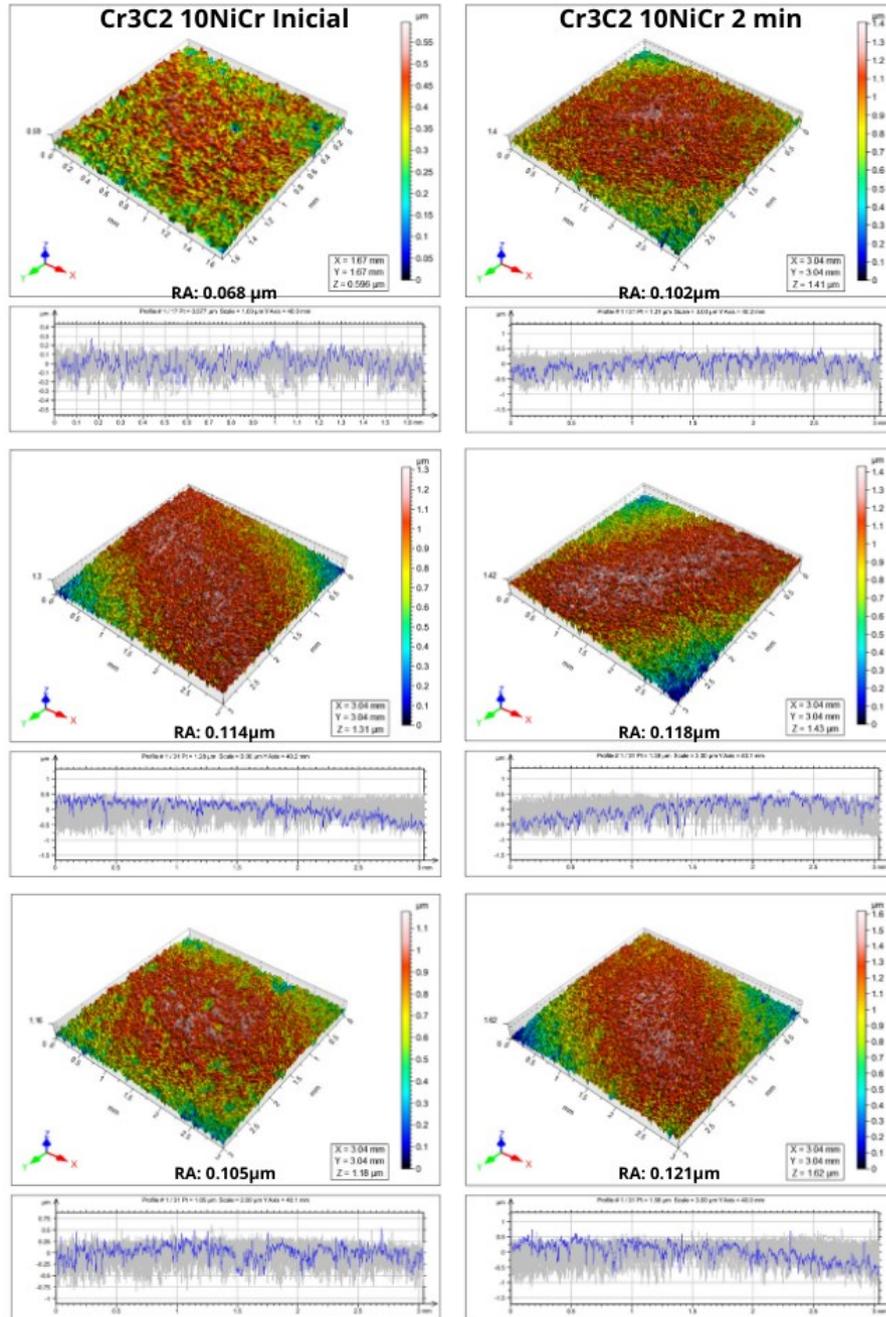
Os resultados obtidos através do perfilômetro são apresentados a seguir nas figuras 16 até 21, para a rugosidade inicial de cada revestimento assim como a rugosidade a cada 2 minutos do ensaio de perda de massa.

Figura 16 – Resultados Rugosidade Cr3C2 7NiCr



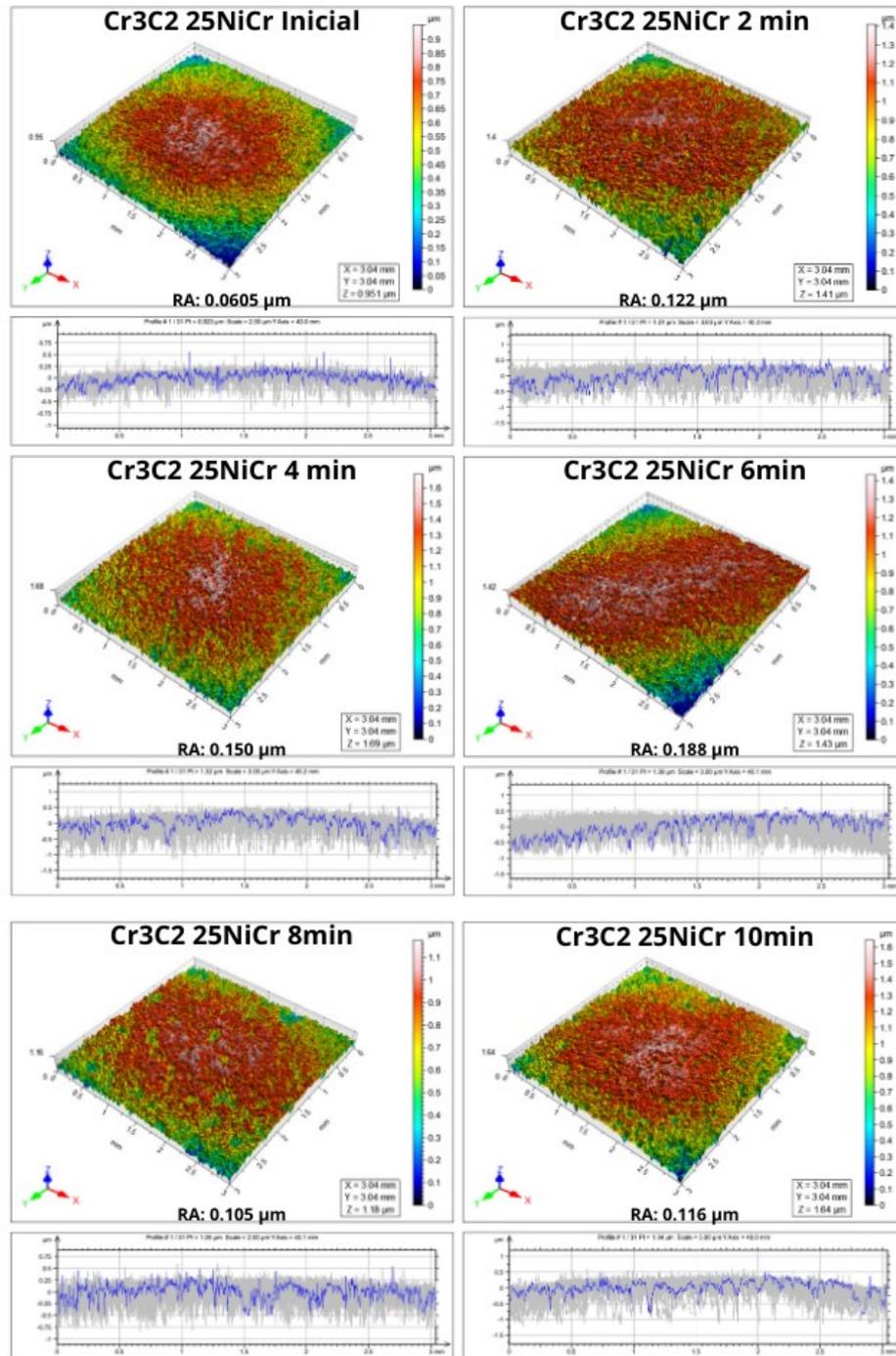
Fonte: Autoria Própria (2024)

Figura 17 – Resultados Rugosidade Cr3C2 10NiCr



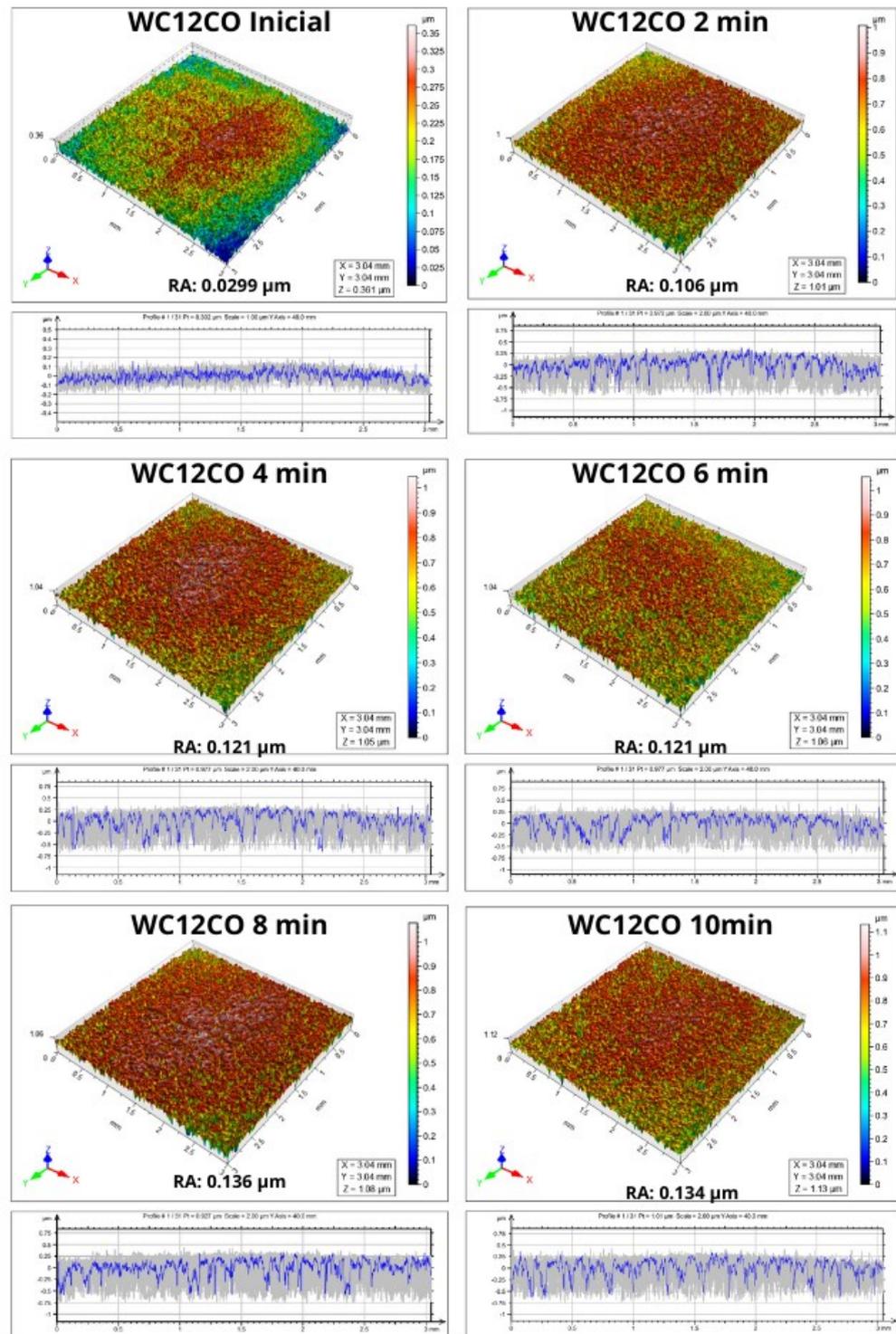
Fonte: Autoria Própria (2024)

Figura 18 – Resultados Rugosidade Cr3C2 25NiCr



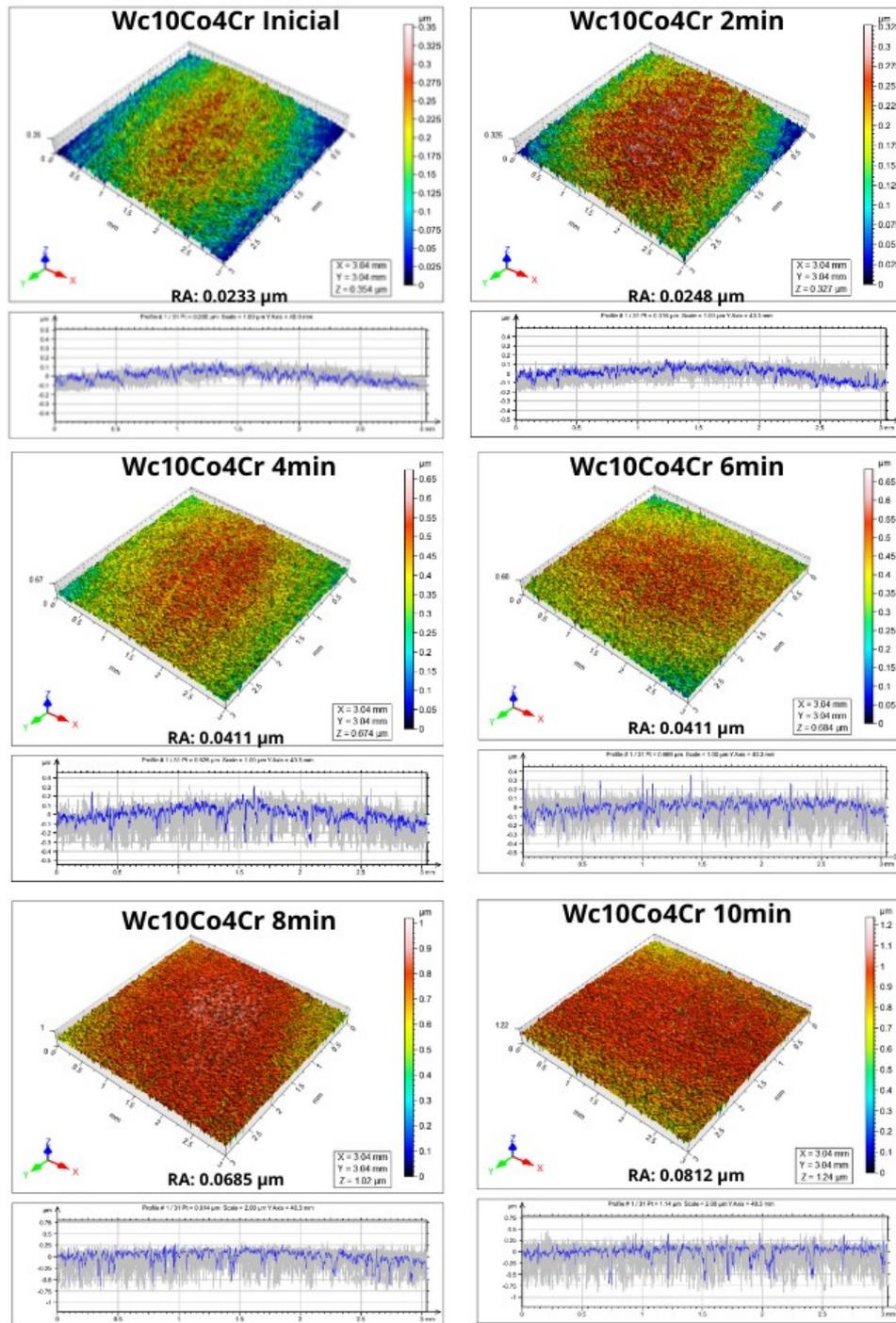
Fonte: Autoria Própria (2024)

Figura 19 – Resultados Rugosidade WC12CO



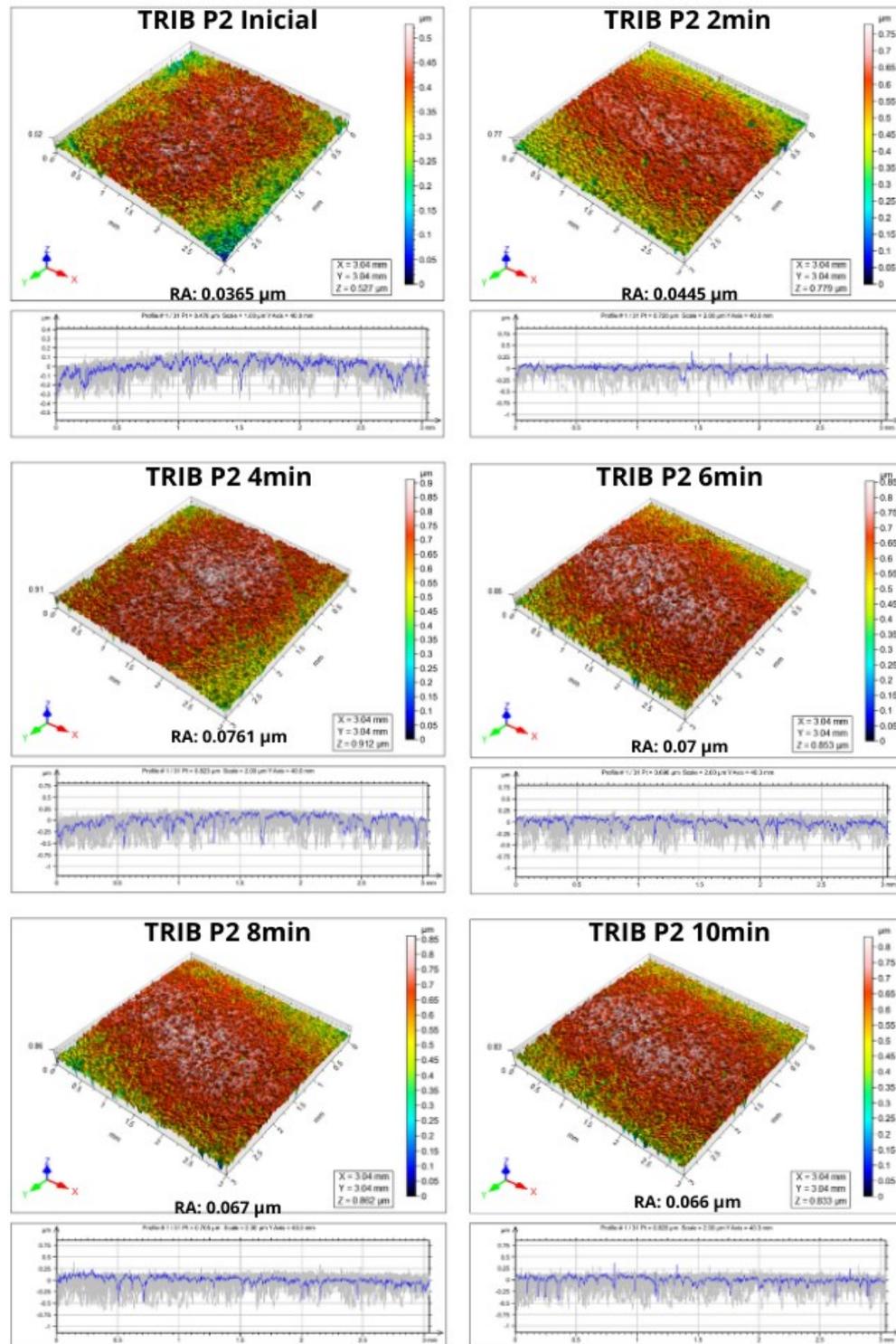
Fonte: Autoria Própria (2024)

Figura 20 – Resultados Rugosidade WC10Co4Cr



Fonte: Autoria Própria (2024)

Figura 21 – Resultados Rugosidade Triboloy

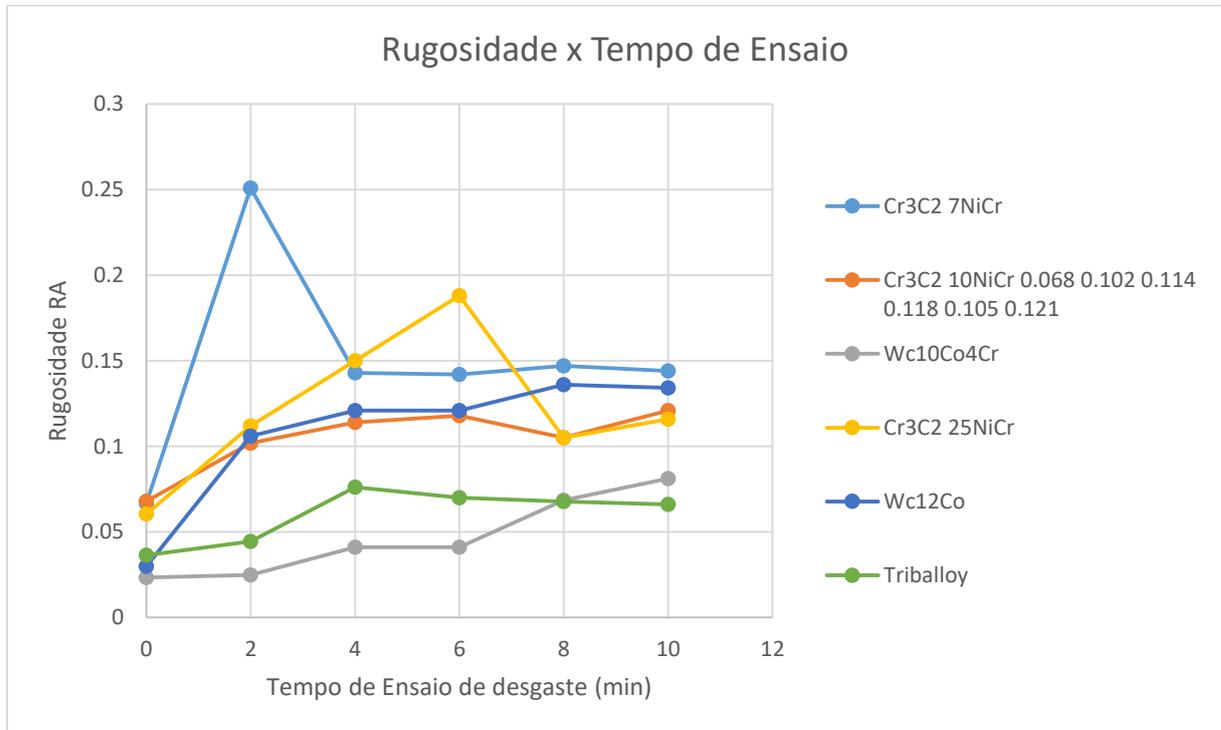


Fonte: Autoria Própria (2024)

O gráfico 6 apresenta os resultados obtidos ao observar a variação da rugosidade no parâmetro RA. Se nota que todos os revestimentos sofreram variação significativa no

início do ensaio e alguns, como Cr3C2 25NiCr, também sofreram variação do valor de RA ao longo do ensaio, decrescendo consideravelmente.

Gráfico 6 – Resultados Rugosidade x Tempo de Ensaio



Fonte: Autoria Própria (2024)

A tabela 15 mostra a fonte de dados para construção do gráfico 6.

Tabela 15 – Dados de RA dos Revestimentos

Cr3C2 7NiCr		Cr3C2 10NiCr		Wc10Co4Cr	
Tempo (min)	RA	Tempo (min)	RA	Tempo (min)	RA
0	0.0668	0	0.068	0	0.0233
2	0.251	2	0.102	2	0.0248
4	0.143	4	0.114	4	0.0411
6	0.142	6	0.118	6	0.0411
8	0.147	8	0.105	8	0.0685
10	0.144	10	0.121	10	0.0812

Cr3C2 25NiCr		Wc12Co		Triballoy	
Tempo (min)	RA	Tempo (min)	RA	Tempo (min)	RA
0	0.0605	0	0.0299	0	0.0365
2	0.112	2	0.106	2	0.0445
4	0.15	4	0.121	4	0.0761
6	0.188	6	0.121	6	0.07
8	0.105	8	0.136	8	0.0678

5 CONCLUSÃO

Dentre as aplicações e vantagens da aspersão térmica se pode concluir que o conhecimento sobre a técnica é de grande vantagem na análise da empregabilidade em novas áreas da indústria, com grande potencial de minimização de custos.

A maior média de dureza dos revestimentos depositados por HVOF foi do revestimento de WC10Co4Cr, seguida pelo Cr3C2 7NiCr. Em conclusão, os resultados obtidos pelo estudo da aspersão térmica por HVOF revelam que embora os resultados de dureza tenham sido maiores para WC10Co4Cr e Cr3C2 7NiCr, foram os revestimentos de Tribaloy e WC10Co4Cr que demonstraram maior resistência a perda de massa em comparação as outras opções avaliadas. Esse resultado sugere que estes revestimentos são uma alternativa para desempenho em desgaste abrasivo, além de evidenciar pela metalografia e análise da rugosidade que suas estruturas se diferem e são importantes para análise de resultados.

Os revestimentos WC12Co e WC10Co4Cr apresentaram um aumento progressivo de aumento de rugosidade com o decorrer dos ensaios, enquanto que os revestimentos Tribaloy e carboneto de cromo com diferentes teores de NiCr apresentaram uma maior rugosidade entre 2 e 6 minutos, com posterior redução de rugosidade.

REFERÊNCIAS

- ASTM. ASTM E2109-01 - **Standard test methods for determining area percentage porosity in thermal sprayed coatings**. ASTM standard, v. E2109- 01, p. 1–8, 2014.
- ASTM E384, **Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
- BARBEZAT, Gérard. **Application of thermal spraying in the automobile industry**. v. 201, n. 5, p. 2028–2031, 2006.
- CALLISTER, W.D., Jr. **Materials Science and Engineering, An Introduction**. 3º Ed. John Wiley & Sons, Inc., 1994.
- COLLINS, Jack A. **Failure of materials in mechanical design**. 2. ed. Columbus: John Wiley & Sons, 1993.
- FAUCHAIS, Pierre e HEBERLEIN, Joachim e MAHER, Boulos. **From Powder to Part**. 1ºed. Springer, 2014.
- FRANEK, Friedrich e BADISCH, Ewald e KIRCHGASSNER, Martin. **Advanced Methods for Characterisation of Abrasion/Erosion Resistance of Wear Protection Materials**. FME Transactions, v. 37, p. 61–70, 2009.
- LAMANA, Murilo Sérgio. **Influência do processo de deposição HVOF com combustível líquido e gasoso na resistência ao desgaste de revestimentos de carboneto de tungstênio com diferentes teores de cobalto**. 2017. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2017.
- LIMA, CARLOS CAMELLO e TREVISAN, ROSEANA. **Aspersão Térmica: Fundamentos e Aplicação**. 2º ed. São Paulo: [s.n.], 2007.
- SILVEIRA, Luciana Leite. **Resistência à corrosão e cavitação de revestimentos FeMnCrSi depositados por processos de aspersão térmica de alta velocidade**. 2018. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2018.
- PAWLOWSKI, Lech. **The science and engineering of thermal spray coatings**. 2. ed. London: John Wiley & Sons, 2008.
- RIBAS, Murilo Teixeira. **Influência da razão propano-oxigênio e do fluxo total de gases na resistência ao desgaste de revestimentos Cr3C2-25NiCr depositados pelo processo HVOF**. 2019. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2019.
- SULCROMO. **Processo de Metalização Por HVOF**. 2022. Disponível em: <https://www.sulcromo.com.br/blog/processo-de-metalizacao-por-hvof-conheca-as-vantagens/>. Acesso em: 10 fev.2024