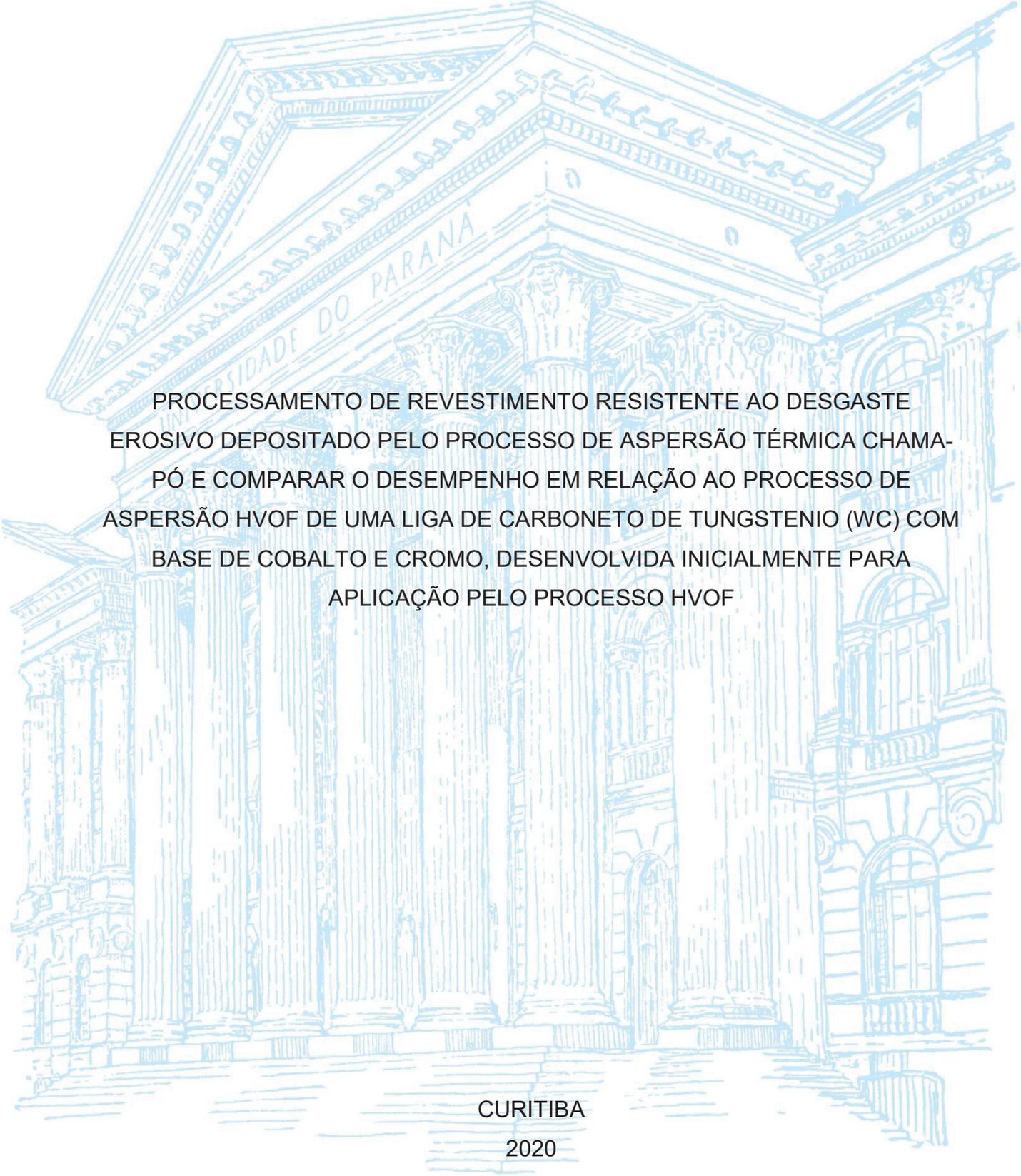


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

PEDRO POLATO BITES COSTA



PROCESSAMENTO DE REVESTIMENTO RESISTENTE AO DESGASTE  
EROSIVO DEPOSITADO PELO PROCESSO DE ASPERSÃO TÉRMICA CHAMA-  
PÓ E COMPARAR O DESEMPENHO EM RELAÇÃO AO PROCESSO DE  
ASPERSÃO HVOF DE UMA LIGA DE CARBONETO DE TUNGSTENIO (WC) COM  
BASE DE COBALTO E CROMO, DESENVOLVIDA INICIALMENTE PARA  
APLICAÇÃO PELO PROCESSO HVOF

CURITIBA

2020

PEDRO POLATO BITES COSTA

PROCESSAMENTO DE REVESTIMENTO RESISTENTE AO DESGASTE  
EROSIVO DEPOSITADO PELO PROCESSO DE ASPERSÃO TÉRMICA CHAMA-  
PÓ E COMPARAR O DESEMPENHO EM RELAÇÃO AO PROCESSO DE  
ASPERSÃO HVOF DE UMA LIGA DE CARBONETO DE TUNGSTENIO (WC) COM  
BASE DE COBALTO E CROMO, DESENVOLVIDA INICIALMENTE PARA  
APLICAÇÃO PELO PROCESSO HVOF

Dissertação apresentada ao curso de Pós-  
Graduação em Engenharia Mecânica, Setor de  
Tecnologia, Universidade Federal do Paraná,  
como requisito parcial à obtenção do título de  
Mestre em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Ramon Sigifredo Cortes  
Paredes

CURITIBA

2020

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Costa, Pedro Polato Bites

Processamento de revestimento resistente ao desgaste erosivo depositado pelo processo de aspersão térmica chama-pó e comparar o desempenho em relação ao processo de aspersão HVOF de uma liga de carboneto de tungstênio (WC) com base de cobalto e cromo, desenvolvida inicialmente para aplicação pelo processo HVOF / Pedro Polato Bites Costa. – Curitiba, 2020.

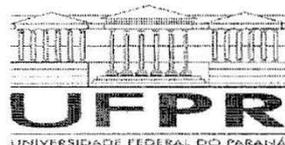
1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Ramon Sigifredo Cortes Paredes

1. Aspersão Térmica. 2. Tungstênio. 3. Combustíveis líquidos. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Paredes, Ramon Sigifredo Cortes. IV. Título.

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SETOR DE TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA  
MECÂNICA - 40001016040P5

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA MECÂNICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **PEDRO POLATO BITES COSTA** intitulada: **PROCESSAMENTO DE REVESTIMENTO RESISTENTE AO DESGASTE EROSIVO DEPOSITADO PELO PROCESSO DE ASPERSÃO TÉRMICA CHAMA-PÓ E COMPARAR O DESEMPENHO EM RELAÇÃO AO PROCESSO DE ASPERSÃO HVOF DE UMA LIGA DE CARBONETO DE TUNGSTENIO (WC) COM BASE DE COBALTO E CROMO, DESENVOLVIDA INICIALMENTE PARA APLICAÇÃO PELO PROCESSO HVOF**, sob orientação do Prof. Dr. RAMON SIGIFREDO CORTES PAREDES, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua **APROVAÇÃO** no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 31 de Agosto de 2020.

  
RAMON SIGIFREDO CORTES PAREDES

Presidente da Banca Examinadora (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

  
SIDNEI ANTONIO PIANARO

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA)

  
GUSTAVO BAVARESCO SUCHARSKI

Avaliador Externo (INSTITUTO DE TECNOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO)

## RESUMO

Revestimentos depositados por aspersão térmica possuem propriedades e características distintas entre si, dependendo do processo utilizado. Neste trabalho foi estudada a viabilidade da aplicação por chama-pó de um revestimento contra desgaste, originalmente desenvolvido para aplicação pelo processo HVOF. Foi realizado um planejamento experimental conforme a metodologia de Taguchi, onde foi possível encontrar um revestimento com parâmetros de deposição otimizados em relação a teor de poros e óxidos, dureza e resistência a tração. O revestimento otimizado foi ensaiado pelo ensaio erosivo por slurry, de modo a comparar os resultados com o processo HVOF. Os resultados mostram que a abordagem experimental permitiu obter um conjunto de parâmetros que produziu um revestimento de melhor qualidade, com características morfológicas que o permitiram suportar os esforços do teste de desgaste erosivo por lama (slurry jet), sem haver deslocamento. Sendo assim, foi possível obter um revestimento com resistência levemente superior quando comparado a resultados do metal de base de aço inoxidável supermartensítico CA6NM porém, apresenta resultado inferior quando comparado ao mesmo revestimento depositado por HVOF

Palavras-chave: Aspersão Térmica. Slurry. Carboneto de tungstênio. Chama-pó.

## **ABSTRACT**

Thermal sprayed coatings have different characteristics and properties depending on the process utilized. This work's intent is to study and enable the application of a flame spray coating of an erosion resistant powder, initially developed for application via HVOF process. A Taguchi experimental design was made to study the influences of the utilized deposition parameters to find the optimized configuration based on hardness, adherence, oxide and pores content. The optimized coating was then tested on a slurry erosion test to compare with HVOF results. The results show that the design of experiment allowed a combination of parameters that produced a higher quality coating with morphologic characteristics that resisted the strains of a slurry jet erosion test without reaching substrate. With that it was possible to create a coating with superior performance to the base metal CA6NM, but inferior to the same coating deposited with the HVOF process.

Keywords: Thermal Spray. Slurry. Tungsten carbide. Flame spray.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de funcionamento do processo de aspersão térmica.....	16
Figura 2 - Esquema de formação de um revestimento por aspersão térmica. ....	16
Figura 3 - Classificação dos principais processos de aspersão de acordo com a sua fonte geradora de calor. ....	18
Figura 4 - Desenho esquemático do processo de aspersão térmica chama com alimentação axial de pó (FS Pó). ....	19
Figura 5 - Configurações de combustão. ....	20
Figura 6 – Modelo esquemático da tocha de HVOF com combustível gasoso. ....	22
Figura 7 – Modelo esquemático da tocha de HVOF com combustível líquido. ....	24
Figura 8 - Resistência à erosão por sedimentos em diferentes materiais. ....	25
Figura 9 – Microestrutura do revestimento Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> – 25 NiCr.....	26
Figura 10 - Seção transversal do revestimento Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> – 25 NiCr sobre o substrato .	27
Figura 11 - Perda de massa por desgaste abrasivo dos revestimentos (Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> e WC) versus o número de ciclos .....	29
Figura 12 – Microestrutura do revestimento WC – 10Co <sub>4</sub> Cr aspergido por HVOF. ...	30
Figura 13 - Seção transversal do revestimento WC – 10Co <sub>4</sub> Cr sobre o substrato ...	31
Figura 14- Dureza Vickers do revestimento de WC - 10Co <sub>4</sub> Cr aspergido por HVOF. ....	32
Figura 15 – Desenvolvimento do desgaste por cavitação dos revestimentos de WC e Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> .....	33
Figura 16 - Degaste por cavitação do revestimento de WC – 10Co <sub>4</sub> Cr em diferentes tamanhos de partículas. ....	33
Figura 17- Desgaste erosivo do revestimento WC aspergido e aço inox F6NM .....	34
Figura 18 - Imagens do pó utilizado (WC 10Co <sub>4</sub> Cr) obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura. Ampliação: (a) 1000x, (b) 6000x. ....	38
Figura 19. Imagens do pó utilizado (WC 10Co <sub>4</sub> Cr) após preparação metalográfica obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura. Ampliação: (a) 20000x, (b) 6000x. ....	39
Figura 20. Cortadeira de precisão Isomet 4000. ....	41
Figura 21 - Lixadeira e politriz Buheler Beta. ....	42
Figura 23 - Microscópio eletrônico de varredura Tescan Vega 3. ....	42
Figura 24 – Indentador Vickers utilizado. ....	43

Figura 25. Diagrama esquemático do equipamento de Ensaio por Jato de Lama. ...	46
Figura 26- Slurry Jet Erosion DUCOM .....	46
Figura 27- Porta amostra confeccionado para ensaios em revestimentos aspergidos. .....	47
Figura 28- Imagens da areia utilizada no ensaio de desgaste por Slurry Jet Erosion. .....	48
Figura 29 – A) Aplicação dos revestimentos. B) Medição de espessura.....	49
Figura 30 – MEV da amostra B1 - WOKA 3652 (WC10Co4Cr) depositado por Chama-pó. Em a) visão geral, em b) detalhe com ampliação de 1000x e em c) com 3000x.....	50
Figura 31 – MEV da amostra B2 - WOKA 3652 (WC10Co4Cr) depositado por Chama-pó. Em a) visão geral, em b) detalhe com ampliação de 1000x e em c) com 3000x.....	50
Figura 32 – MEV da amostra B3 - WOKA 3652 (WC10Co4Cr) depositado por Chama-pó. Em a) visão geral, em b) detalhe com ampliação de 1000x e em c) com 3000x.....	50
Figura 33 – MEV da amostra B4 - WOKA 3652 (WC10Co4Cr) depositado por Chama-pó. Em a) visão geral, em b) detalhe com ampliação de 1000x e em c) com 3000x.....	51
Figura 34 - Boxplot dureza .....	52
Figura 35 - Boxplot oxidação.....	53
Figura 36 - Boxplot porosidade .....	54
Figura 37 - Boxplot de aderência .....	55
Figura 38 - Efeitos principais sobre as médias do percentual de porosidade dos revestimentos de chama-pó.....	57
Figura 39 - Efeitos principais sobre as médias de teor de oxidação dos revestimentos de chama-pó. ....	57
Figura 40 - Efeitos principais sobre as médias de tensão de ruptura dos revestimentos de chama-pó.....	58
Figura 41 - Efeitos principais sobre as médias de microdureza Vickers dos revestimentos de chama-pó.....	59
Figura 42 - Perda de massa por slurry .....	61
Figura 43 - Comparação da porosidade dos processos.....	62
Figura 44 - Comparação de dureza.....	62

Figura 45 - Comparação da perda de massa por slurry. \* Valores retirados de Bertuol  
(2020).....63

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Revestimentos estudados por Sugiyama. ....	26
Tabela 2– Composição química das ligas em pó utilizados na pesquisa. ....	38
Tabela 3 - Parâmetros de processo utilizados nas otimizações dos revestimentos por Chama-pó .....	40
Tabela 4 - Arranjo Ortogonal L4 de Taguchi com os parâmetros de processo utilizados na otimização dos revestimentos. ....	40
Tabela 5 - Nome e composição química da liga otimizadas para o processo Chama-pó. ....	40
Tabela 6–Metodologia utilizada para ensaio de desgaste.....	44
Tabela 7 - Parâmetros do ensaio por jato de <i>slurry</i> .....	47
Tabela 8 - Dureza.....	51
Tabela 9 - Teor de óxidos.....	52
Tabela 10 - Nível de porosidade .....	53
Tabela 11 - Resultados de aderência.....	54
Tabela 12 - Ranque de influência dos parâmetros para a ligas depositados por Chama-pó. ....	55
Tabela 13 – Níveis que apresentaram melhores resultados, associados por igualdade significativa pelo teste de Tukey, para os revestimentos por Chama-pó. ....	59
Tabela 14 - Resultados de desgaste por <i>slurry</i> (corpo de prova polido). ....	60

## LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

HVOF	- High Velocity Oxy fuel
FS	- Flame spray
ASP	- Arc spray

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
1.1	JUSTIFICATIVA.....	13
1.2	OBJETIVOS .....	14
1.2.1	Objetivos específicos.....	14
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>15</b>
2.1	ASPERSÃO TÉRMICA.....	15
2.1.1	Processos de Aspersão Térmica .....	17
2.1.1.1	Aspersão por Chama (Flame Spray – FS).....	18
2.1.1.2	Aspersão por HVOF - High VelocityOxy-Fuel.....	21
2.1.1.3	HVOF – Combustível Líquido .....	24
2.2	REVESTIMENTOS ASPERGIDOS RESISTENTES AO DESGASTE .....	25
2.2.1	Revestimento de Carboneto de Cromo ( $Cr_3C_2$ ) – 25NiCr.....	26
2.2.2	Revestimento de Carboneto de Tungstênio (WC) - 10Co4Cr.....	30
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>36</b>
3.1	MATERIAIS COMERCIAIS SELECIONADOS PARA APLICAÇÕES DOS REVESTIMENTOS .....	37
3.2	APLICAÇÕES DAS LIGAS PELO PROCESSO DE ASPERSÃO TÉRMICA CHAMA-PÓ (FS-PÓ).....	39
3.2.1	Otimização de parâmetros para Chama-pó (FS-pó).....	40
3.2.2	Revestimentos otimizados de Chama-pó (FS-pó) .....	41
3.3	PREPARAÇÃO METALOGRÁFICA .....	41
3.4	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	42
3.4.1	Análise da Porosidade Microscópio Ótico e Microscópio Eletrônico de Varredura.....	43
3.5	ENSAIO DE MICRODUREZA VICKERS.....	43
3.6	PROCEDIMENTOS PARA OS ENSAIOS DE DESGASTE.....	44
3.6.1	Medições da Perda de Massa Acumulada .....	44
3.6.2	Ensaio de Erosão por Jato De Lama (Slurry) .....	45
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>49</b>
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS REVESTIMENTOS DEPOSITADOS POR CHAMA-PÓ .....	49
4.1.1	Resultados de dureza.....	51

4.1.2	Resultados de Oxidação.....	52
4.1.3	Resultados de Porosidade.....	53
4.1.4	Resultados de Aderência.....	54
4.2	INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE DEPOSIÇÃO PARA CHAMA-PÓ ..	55
4.2.1	Revestimentos com parâmetros otimizados para Chama-pó (FS) .....	60
4.3	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE DESGASTE .....	60
4.4	COMPARAÇÃO COM HVOF .....	61
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>64</b>
5.1	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	64
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>65</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica no Brasil é produzida em sua maior parte por usinas hidrelétricas. Um fator problemático na produção dessa energia é o desgaste que ocorre nas paletas das turbinas geradoras, que altera o perfil hidráulico das mesmas, causando assim redução da eficiência energética, necessitando de paradas regulares para manutenção. A maioria dos revestimentos para turbinas é voltado para desgaste por cavitação, porém, em rios com alto teor de sedimentos torna-se mais relevante o desgaste erosivo por sedimentos. A recuperação das turbinas pode ser realizada por soldagem, porém isso acarreta em uma necessidade de se recuperar o perfil hidráulico perdido devido as distorções causadas pelo processo. Uma alternativa que vem sendo estudada é a recuperação de espessura e aplicação de revestimentos por aspersão térmica, um processo que gera gradientes de deformação muito menores, devido ao baixo gradiente térmico. Atualmente as aplicações são realizadas pelo processo “*High Velocity Oxy-Fuel*” (HVOF), que proporciona os melhores resultados quanto a perfil do revestimento, porém o processo “*Flame Spray*” (FS) tem custo de aplicação inferior, além de proporcionar menor ruído de aplicação, o que torna a deposição mais prática em campo.

### 1.1 JUSTIFICATIVA

Materiais resistentes ao desgaste são normalmente desenvolvidos para aplicações pelos processos chama de alta velocidade (HVOF) ou plasma de arco não transferido (APS), porém estes processos envolvem um custo de aplicação relativamente superiores quando comparados a aplicação pelo processo de chama-pó (FS). Além do que, a não utilização do processo de aspersão térmica chama convencional (FS) é baseada na dificuldade de encontrar referências na literatura sobre erosão por partículas em revestimentos aplicados por esta técnica.

A comparação entre dois processos de aspersão térmica, um convencional (FS) e outro mais moderno (HVOF), vai ampliar as possibilidades de aplicações de revestimentos resistentes ao desgaste. Isto envolve a relação técnica/econômica, bem como a contribuição de inovação, sendo que estes processos não são utilizados para este tipo de aplicação.

## 1.2 OBJETIVOS

O propósito deste estudo é aplicar revestimento resistente ao desgaste erosivo pelo processo chama-pó a fim de comparar o desempenho em relação ao mesmo material quando depositado pelo processo HVOF. Para tanto será desenvolvido um estudo para viabilizar e otimizar a aplicação pelo processo chama-pó (FS) de uma liga de carboneto de tungstênio (WC) com base de cobalto e cromo, desenvolvida inicialmente para aplicação por HVOF.

### 1.2.1 Objetivos específicos

- Definir os limites de razão de combustão do processo chama-pó;
- Definir as combinações de parâmetros para aplicação do planejamento experimental Taguchi;
- Aplicar os revestimentos conforme o planejamento experimental de Taguchi;
- Caracterizar os revestimentos obtidos em função da dureza, aderência e morfologia (teores de óxidos e poros);
- Aplicar as ferramentas estatísticas conforme previsto no planejamento em função dos resultados de caracterização;
- Validar o revestimento de confirmação de acordo com os parâmetros otimizados;
- Determinar a resistência ao desgaste erosivo, pelo teste slurry jet, do revestimento otimizado.
- Comparar os resultados de desempenho no teste de desgaste com os da literatura especializada.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

Para melhor compreender os limites e aplicações é necessário começar com a explanação do processo em si.

### 2.1 ASPERSÃO TÉRMICA

O processo de aspersão térmica é formado por um grupo de técnicas que permitem depositar revestimentos na forma de camadas de materiais metálicos, não metálicos ou compósitos ancorados por deformação mecânica, sobre um substrato previamente preparado, com a intenção de alterar suas características superficiais (ASM, 2004; PAWLOWSKI, 2008). A aplicação de revestimento, de uma forma geral, visa principalmente aproveitar as vantagens das propriedades específicas do material depositado, e com isso aumentar a resistência à corrosão e diminuir as taxas de desgaste e erosão em peças e componentes estruturais sujeitos a ambientes agressivos. Além disto, também tem sido utilizada para revestir peças que necessitam de isolamento térmico e elétrico ou compatibilidade biológica (PAREDES, 2012; LIMA; TREVISAN, 2007).

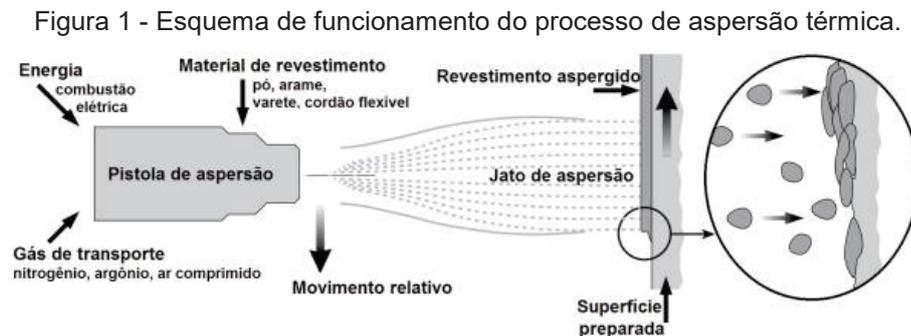
Para uma definição geral dos processos de aspersão térmica tem-se que, o material de revestimento, que pode estar inicialmente na forma de pós, arames ou vareta, é alimentado em uma pistola de aspersão que possui uma fonte de calor, cuja origem pode ser plasma, chama por combustão de gases, gases quentes ou arco elétrico ; SUCHARSKI, 2012).

Estas fontes de calor fornecem a energia térmica para que o material a ser depositado atinja o estado fundido ou de alta plasticidade (nos processos clássicos). Uma parte da energia cinética é proveniente do gás de transporte (ar comprimido ou um gás inerte). Os gases do plasma ou da combustão, o ar comprimido ou o gás inerte se expandem acelerando as partículas do material fundido e/ou semifundido contra a superfície do substrato (SUCHARSKI, 2012). Ao se chocarem contra a superfície, as partículas achatam-se e aderem-se mecanicamente ao substrato, assim como sobre as partículas já existentes, Deste modo, o revestimento é então formado por uma série de camadas sobrepostas, em forma de lamelas, oriundas do espalhamento destas partículas fundidas . Essas camadas são constituídas de

partículas achatadas, contendo inclusões de óxidos, vazios e porosidade (ASM, 2004).

Durante o processo de revestimento, a interação entre os gases e as partículas é essencialmente determinada pela dinâmica dos gases no processo de aspersão.

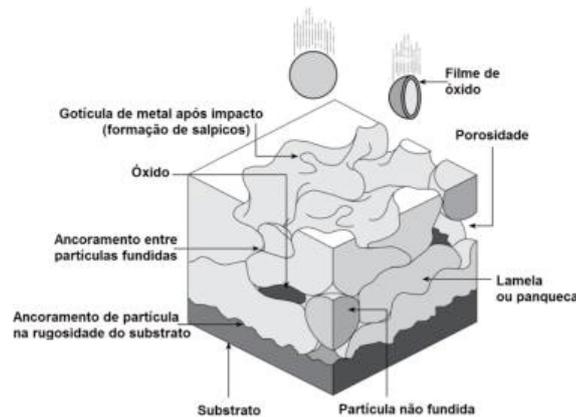
A Figura 1 a seguir, apresenta o funcionamento básico dos processos de aspersão térmica de forma esquemática.



Fonte: Adaptado de Oerlikon (2016).

É importante destacar que no momento do contato das partículas com o substrato é transferida uma elevada energia cinética e térmica, isso gera uma transferência de calor que, em condições especiais, pode ocorrer a difusão de alguns dos constituintes do material aspergido para o substrato, ou até a formação de pontos de microsoldagem, este mecanismo pode ser incentivado utilizando o recurso de pré-aquecer o substrato (PAREDES, 2012; PUKASIEWICZ, 2008; SUCHARSKI, 2012). A Figura 1 mostra o diagrama esquemático do princípio dos processos de aspersão térmica. A Figura 2 ilustra esquematicamente as principais características do revestimento obtido por aspersão térmica.

Figura 2 - Esquema de formação de um revestimento por aspersão térmica.



Fonte: Adaptado de Oerlikon (2016).

Entre as vantagens da aspersão térmica está na grande diversidade de materiais para ser depositados, tais como: a maioria dos metais e suas ligas, óxidos, materiais cerâmicos, cermets, carbonatos, boretos e hidretos (ASM, 1994). Bem como em relação ao custo operacional relativamente baixo.

A aspersão pode ser feita com uma ampla gama de materiais, tais como, metais, polímeros e cerâmicas, sendo aplicados sobre substratos metálicos ou cerâmicos. O objetivo do revestimento é geralmente de proteger o substrato e melhorar suas propriedades mecânicas superficiais, por exemplo, a resistência ao desgaste, térmica, corrosão e/ou aumentar a vida à fadiga dos componentes. O processo também pode ser usado no reparo de peças desgastadas e danificadas. .

### 2.1.1 Processos de Aspersão Térmica

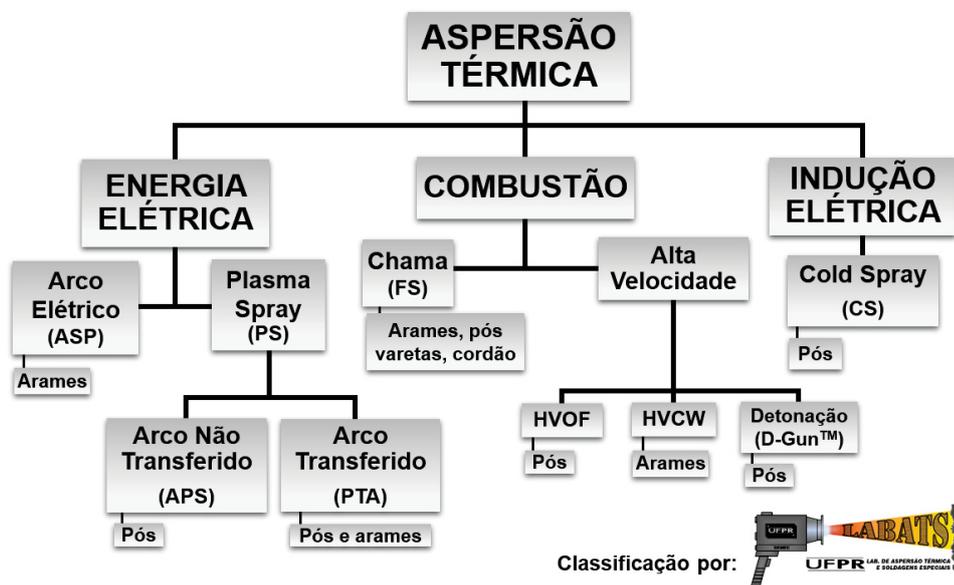
O processo de aspersão trata-se de uma técnica muito versátil. Dentre as técnicas existentes, destacam-se, Plasma Spray (Plasma atmosférico - APS), Wire Arc Spraying (Arco Elétrico - ASP), Flame Spraying (Chama - FS), High VelocityOxy-Fuel (Chama de alta velocidade - HVOF) e o High Velocity Air Fuel (Chama de alta velocidade com ar - HVOF) .

As principais distinções entre os processos de aspersão térmica tradicionais, resume-se na interação entre o gás e o estado das partículas, o que é essencialmente determinada pela dinâmica dos gases no processo.

A temperatura da chama ou arco, a velocidade das partículas e a atmosfera de aspersão, são as principais variáveis presentes entre as diferentes técnicas de revestimentos por aspersão. As propriedades e qualidade do revestimento, bem como, a porosidade, a força de adesão das partículas e a presença de óxidos são

fortemente influenciadas em função da escolha do processo de revestimento trabalhado. A Figura 3, apresenta de forma geral um esquema dos principais processos de aspersão, classificando-os de acordo com sua fonte de calor, tais como, energia elétrica e combustão.

Figura 3 - Classificação dos principais processos de aspersão de acordo com a sua fonte geradora de calor.



Fonte: Adaptado de Sucharski (2012).

Basicamente os processos de deposição por aspersão térmica diferenciam-se pela energia cinética e térmica de cada processo, onde processos de elevada energia térmica são mais indicados para materiais de elevada temperatura de fusão, por exemplo cerâmicos, e elevada energia cinética promove revestimentos de melhor aderência e menor porosidade.

Os diferentes processos de aspersão térmica de interesse relevante a este documento serão melhores detalhados na sequência deste tópico.

#### 2.1.1.1 Aspersão por Chama (Flame Spray – FS)

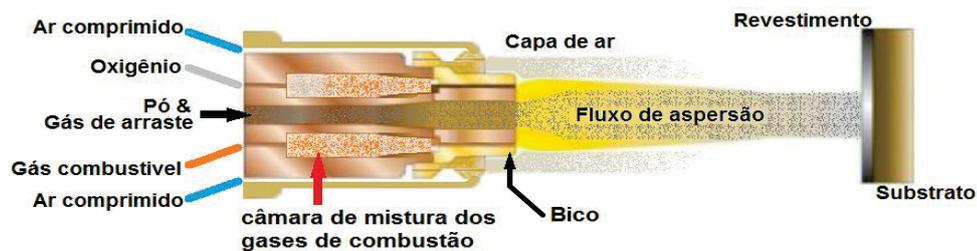
O processo de aspersão por chama pode utilizar como material de adição metais, ligas metálicas, materiais cerâmicos ou alguns polímeros, que podem ser

utilizados sob a forma de pó ou arame (sólido ou tubular). Este processo de aspersão térmica possui como fonte de calor uma chama oxiacetilênica (ASM, 2004).

No trabalho de Padilha (2011) é descrito que a mistura dos gases ( $C_2H_2 + O_2$ ) no bico da pistola produz uma combustão capaz de fundir o material a ser depositado. Em seguida, um jato composto por gases da combustão e o gás de transporte atomiza o metal fundido projetando-o com velocidade contra o substrato. A variação na porcentagem da mistura de gases utilizados interfere no aporte térmico fornecido à partícula a ser aspergida.

A Figura 4 é apresentado um desenho esquemático de um corte lateral da pistola de chama com alimentação axial de pó (FS-pó), onde pode ser observado que durante a deposição, o pó é transportado pelo gás de arraste (usualmente nitrogênio ou argônio), passando pelo bocal, onde ocorre a combustão da chama que aquece o material durante seu transporte ao substrato, sendo que as partículas podem ou não sofrerem fusão durante o transporte. Ao se chocarem contra o substrato as partículas se deformam mecanicamente (formando panquecas) e se empilham formando o revestimento (PAREDES, 2012).

Figura 4 - Desenho esquemático do processo de aspersão térmica chama com alimentação axial de pó (FS Pó).



FONTE: Adaptado de Oerlikon Metco (2016).

Nesta configuração de pistola de aspersão térmica, o combustível e o oxigênio passam por uma câmara de mistura de gases antes de iniciar a combustão afrente do bico. O ganho de energia cinética pelas partículas em voo é dado pelo gás de transporte somado com a expansão dos gases de combustão, formando o fluxo de aspersão. O ar comprimido é utilizado para resfriar o bico da pistola e formar uma capa de ar que envolve o fluxo de aspersão, concentrando a chama e diminuindo o espalhamento das partículas aspergidas. O material aquecido, impelido contra o substrato, sofre deformação pelo impacto, se conformando sobre a

rugosidade da superfície, formando pontos de ancoramento mecânico e, com isso, garantindo a aderência, resultando em uma camada de revestimento (LIMA; TREVISAN, 2007).

O processo chama-pó foi o primeiro a ser inventado e implementado industrialmente, sendo sua aplicação simples e de baixo custo (quando comparado aos outros processos), entretanto possui baixa produtividade, além de promover revestimentos mais porosos, com maior teor de óxidos e menor aderência ao substrato. Uma vantagem desse processo é a utilização de material de adição na forma de pó, o que permite uma gama extremamente vasta de materiais a serem depositados, porém devido a limitação da temperatura da chama torna-se praticamente inviável (com raras exceções) a deposição de materiais cerâmicos.

Por se tratar de um processo com chama oxiacetilênica os fatores que mais influenciam a morfologia do revestimento são os parâmetros relação de combustão e fluxo dos gases de combustão (Figura 5), pois esses fatores influenciam a temperatura, velocidade e teor de oxigênio livre na chama, o que causa grande influência no teor de oxidação e porosidade do revestimento (Costa et al., 2017).

Figura 5 - Configurações de combustão.

Figura	Relação (RC)	Oxigênio (m³/h)	Acetileno (m³/h)	Imagem	Tipo de chama
3 (a)	1	1,133	1,133		Neutra
3 (b)	1,5	1,699	1,133		Oxidante
3 (c)	2,6	2,265	0,849		Oxidante
3 (d)	2	2,265	1,133		Oxidante

Fonte: Costa; et al. (2017).

Além da relação de combustão, também são influentes a distância de deposição e granulometria do pó. Maior distância representa uma partícula que passa maior tempo em contato com a chama, ou seja, possui mais tempo para oxidar, além disso o aumento da distância propicia uma maior dispersão de partículas, o que aumenta a porosidade. Uma granulometria adequada e de faixa estreita proporciona um revestimento mais uniforme, menos poroso e menos oxidado (Costa et al., 2017). Um ponto importante a se notar é que as temperaturas da chama podem degradar alguns carbonetos, então ao se trabalhar com esse tipo de material é importante que as partículas fiquem o menor tempo possível na chama, assim como regular uma chama de menor energia (Costa et al., 2017).

O “flame spray” é caracterizado por atingir velocidade de impacto de partículas de 30 até 180 m/s, temperaturas das partículas em voo entre 2000 e 2800 °C, tensão de aderência média entre 20 e 38 MPa, porosidade entre 15 e 20% e 4 a 15% de óxidos (IRVING; KNIGHT; SMITH, 1993).

#### 2.1.1.2 Aspersão por HVOF - High VelocityOxy-Fuel

Classificado como um processo de aspersão térmica por combustão, o HVOF (High VelocityOxy-Fuel) tem como sua fonte de calor a queima de uma mistura de combustível (gasosos ou líquidos) com gás oxigênio ( $O_2$ ). Também é importante destacar a existência de um processo bem semelhante, conhecido como o HVOF (High Velocity Air Fuel) que usa ar atmosférico comprimido como fonte de comburente, em substituição ao gás oxigênio puro comprimido. Ambos os processos de HVOF e HVOF serão discutidos nos tópicos seguintes.

O processo de HVOF trata-se de um dos processos de aspersão térmica mais difundido atualmente, isto é dado pelas vantagens apresentadas quando comparado com os diversos processos existentes. As principais vantagens do HVOF são citadas por SIDHU et al. (2005) como: Baixa porosidade no revestimento; Elevada dureza superficial; Elevada força de ligação entre partículas; Baixa decarbonização.

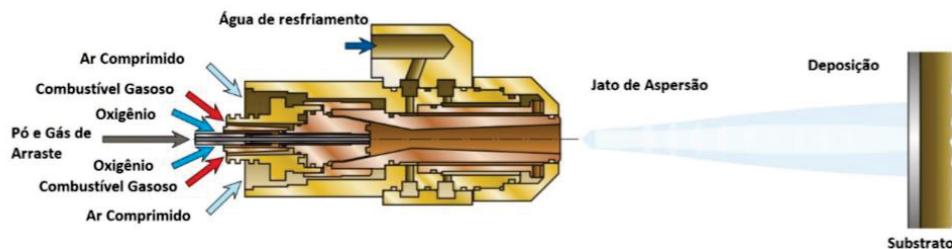
Deste modo, o revestimento por HVOF vem ganhando popularidade e está sendo extensivamente estudado. Uma vez que, o mesmo é capaz de produzir revestimentos de metais, compósitos e cerâmicas sobre peças que requerem resistência a trabalhos em condições extremas .

Industrialmente falando, o HVOF pode ser encontrado numa vasta área de aplicação, podemos citar, a área automotiva, aeronáutica e aeroespacial, marinha e em outros ramos diversos . Desde pesquisas antigas, como na década de 1990, MOSKOWITZ (1993) cita a aplicação de HVOF no ramo petroquímico, na fabricação de componentes como tubulações, válvulas, recipientes, trocadores de calor, entre outros componentes que exigem elevada resistência ao desgaste por erosão e corrosão. Estudos mais recentes, como citado por LAVIGNE et al. (2017), a aplicação do revestimento por HVOF em plantas hidroelétricas, vem apresentando ser uma boa técnica alternativa para substituir o método tradicional de soldagem.

A técnica de revestimento em questão, é predominantemente usada como barreira protetiva para componentes mecânicos que necessitam de elevada vida a fadiga, protegendo-os quanto ao desgaste, corrosão e oxidação.

Os equipamentos necessários para realização eficiente do processo consistem em uma pistola de gás, unidade de alimentação de pó, medidor de vazão, e uma unidade de suprimento de gás. A unidade de alimentação de pó compreende um conjunto com funil, vibrador de ar, medidor da taxa de alimentação e gabinete de controle . Um desenho esquemático do processo de HVOF com combustível gasoso está representado na Figura 6.

Figura 6 – Modelo esquemático da tocha de HVOF com combustível gasoso.



Fonte: Adaptado de (WILSON; METCO, 2013).

O material aspergido, na forma de pó, é alimentado a partir da unidade de alimentação, que através do gás, se transporta até a pistola, zona onde ocorre a combustão. A quantidade de pó pode ser regulada usando o medidor da taxa de alimentação do pó.

Na zona de combustão, o material em pó quando em contato com a chama, fica no estado fundido ou semi fundido, dependendo é claro, da taxa de alimentação

do material e da temperatura de fusão. . As partículas fundidas ou semi fundidas, são então aceleradas em velocidades supersônicas através de um bocal tipo Venturi, que as propõe com alta energia cinética em direção ao substrato. (SIDHU *et al.*, 2005). Estas partículas, ao atingirem o substrato, deformam-se plasticamente achatando-se após o impacto, e em seguida, sofrem um resfriamento natural e se solidificam formando o revestimento. (WILSON; METCO, 2013). As propriedades do revestimento são influenciadas por diversos fatores, dentre eles, destacam-se o material das partículas, a velocidade e temperatura das partículas.

A qualidade do revestimento depende significativamente da temperatura e da velocidade das partículas de pó, que por sua vez, está associada à pressão do gás desenvolvida na câmara de combustão (SIDHU *et al.*, 2005).

Para PICAS *et al.* (2011), não apenas as propriedades dos pós usados são importantes, mas também o processo de aspersão e parâmetros do jato. Deste modo, a produção de revestimentos HVOF requer o controle cuidadoso das variáveis do processo em conjunto com o design e geometria da pistola. Segundo WILSON e METCO (2013), altas velocidades de partículas, aquecimento uniforme e baixo tempo de permanência são parâmetros perfeitos para produzir revestimentos muito densos e fortemente aderidos ao substrato. VOGGENREITER *et al.* (1995), concluiu que a oxidação da camada protetiva corresponde diretamente a fração da fase fundida presente no revestimento. O pesquisador afirma que o ideal é realizar a aspersão por HVOF com temperatura do pó entre as temperaturas de sólido e líquido do material.

A técnica de aspersão por HVOF é caracterizado por apresentar uma velocidade de chama de até 2000 m/s, a qual resulta em um fluxo com velocidade de partículas entre 400 m/s e 800 m/s. No tocante a temperatura das partículas, elas podem atingir em voo entre 1600 °C a 2200 °C, temperatura a qual é um pouco menor quando comparada a outras técnicas de aspersão, como aspersão por plasma por exemplo. Assim, o HVOF produz revestimentos com baixa porosidade e, conseqüentemente, alta densidade e dureza (PICAS *et al.*, 2011).

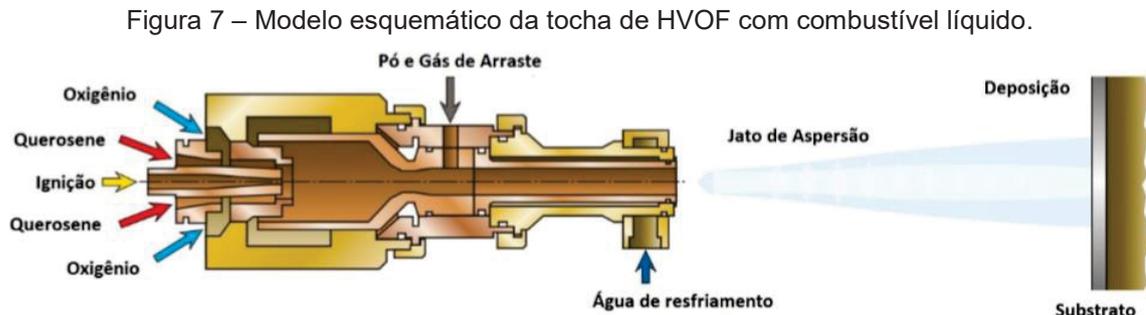
Na literatura, a influência de propriedades mecânicas como dureza e módulo de elasticidade do material a ser aspergido apresenta resultados contraditórios quando relacionado a seus efeitos na resistência a cavitação do revestimento. YUPING *et al.* (2007), cita que a resistência a cavitação de um revestimento está diretamente relacionada a dureza do revestimento. Em contrapartida, Lima e

Trevisan (2007) afirmam que tais características não estão relacionadas diretamente.

As partículas de pó, normalmente trabalhadas na faixa de 10 a 63  $\mu\text{m}$  podem formar camadas protetivas típicas de espessura entre 100 e 300  $\mu\text{m}$ . Sendo assim, o método HVOF produz revestimentos com maior resistência à corrosão quando comparado a outros métodos de aspersão (SIDHU *et al.*, 2005). LAVIGNE *et al.* (2017), complementa que revestimentos por HVOF apresentam propriedades mecânicas únicas e de baixa porosidade, de valores inferiores a 2%.

### 2.1.1.3 HVOF – Combustível Líquido

O processo de aspersão térmica de HVOF com combustível líquido é muito similar ao processo com combustível gasoso. Conforme o esquema apresentado na a seguir na Figura 7.



Fonte: Adaptado de (SULZER METCO, 2013).

Conforme pode ser notado na Figura 7 apresentada anteriormente, o material de deposição (em forma de pó) no processo de HVOF com combustível líquido, é injetado radialmente na pistola e posteriormente a uma câmara de combustão do tipo convergente/divergente, procedimento o qual é contrário ao processo com combustível gasoso (Figura 6). Deste modo, as partículas propelidas sofrem um menor aquecimento, gerando conseqüentemente uma menor eficiência na deposição quando comparado ao processo com combustível gasoso. (RUSCH, 2007)

Para BUNSHAH (1994), o sistema de deposição com combustível líquido é utilizado quando se necessita de uma maior eficiência no fluxo de massa de combustível à câmara de combustão.

## 2.2 REVESTIMENTOS ASPERGIDOS RESISTENTES AO DESGASTE

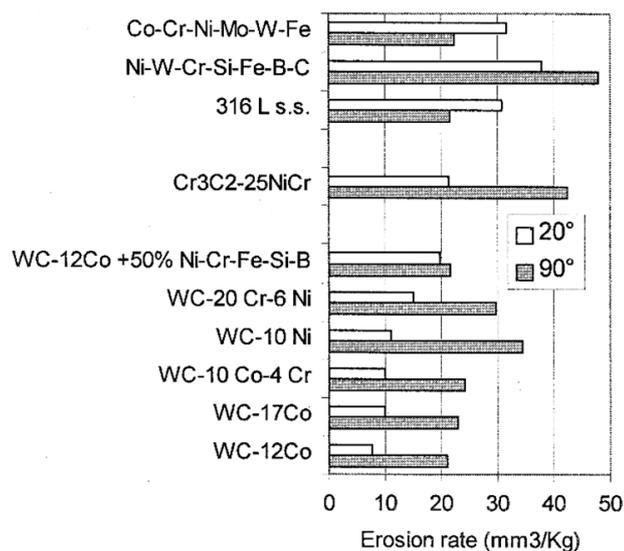
Neste tópico serão apresentadas as propriedades e características dos revestimentos de Carboneto de Cromo e Carboneto de Tungstênio, dando ênfase na resistência ao desgaste destes materiais.

A resistência de um revestimento à erosão por partículas se dá principalmente pela dureza, teor de porosidade e aderência/coesão do revestimento. As ligas que melhor atendem esses requisitos são as ligas que contém altos teores de carbonetos de tungstênio ou de cromo.

Essas ligas são compostas por uma matriz metálica de cromo, cobalto, níquel, etc. cuja função é ancorar os carbonetos sem permitir que eles se desgarrem durante o desgaste (Sugiyama et al., 2005; Kumar et al., 2018; Thakur et al., 2011).

Pequenas alterações na porcentagem dos componentes da matriz podem promover alterações significativas na vida do componente exposto, como é possível observar na Figura 8.

Figura 8 - Resistência à erosão por sedimentos em diferentes materiais.



Fonte: Hawthorne et al. (1999).

Outros autores como Sugiyama et al. (2005) misturam pós de modo a testar ligas experimentais (Tabela 1).

Tabela 1 - Revestimentos estudados por Sugiyama.

Material	Ni	Co	Cr	Fe	NiCr	CrC	WC
DTS-W110	7	–	–	–	–	20	Balance
DTS-W111	7	–	–	–	–	20	Balance
DTS-W118	17	–	–	–	–	20	Balance
DTS-W119	7	–	–	–	10	20	Balance
DTS-W117	20	–	–	–	–	20	Balance
DTS-W130	30	–	–	–	–	20	Balance
DTS-C44	–	–	–	–	25	Balance	–
DTS-W113	–	12	–	–	–	–	Balance
DTS-W115	–	17	–	–	–	–	Balance
DTS-W116	–	10	4	–	–	–	Balance
DTS-W120	–	10	4	–	–	–	Balance

Fonte: Sugiyama et al. (2005)

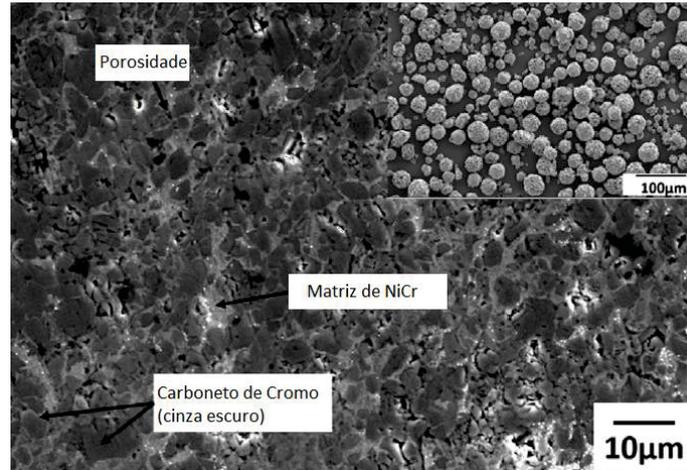
É importante notar que mesmo as ligas experimentais utilizadas têm como base carbonetos de tungstênio ou cromo, já que essas ligas apresentam desempenho superior (Figura 8).

### 2.2.1 Revestimento de Carboneto de Cromo ( $\text{Cr}_3\text{C}_2$ ) – 25NiCr

O Carboneto de Cromo  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  – 25NiCr é um compósito cerâmico de matriz metálica. Este compósito apresenta boa resistência ao desgaste, uma vez que, é constituído por uma matriz tenaz com partículas de elevada dureza de carboneto de cromo, proporcionando-o alta resistência à erosão, abrasão, corrosão e cavitação (Vicenzi, 2007).

Na Figura 9 é apresentada a microestrutura do revestimento de  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  – 25NiCr, a qual destaca em cinza escuro as partículas duras de carboneto de cromo e em cinza claro a matriz tenaz de NiCr.

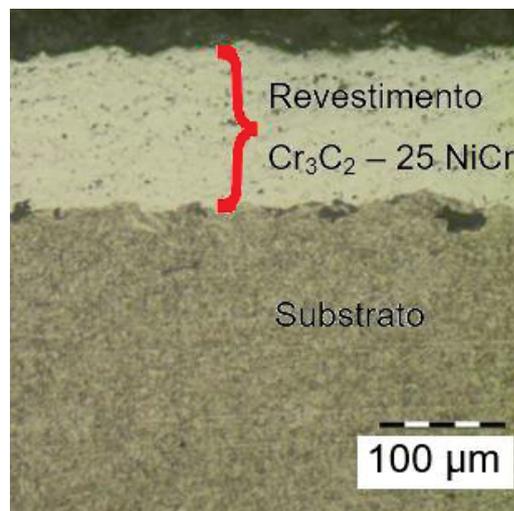
Figura 9 – Microestrutura do revestimento  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  – 25 NiCr.



Fonte: Vashishtha et al. (2017)

A Figura 10 apresenta a seção transversal do revestimento de  $\text{Cr}_3\text{C}_2 - 25\text{NiCr}$  aspergido termicamente por HVOF. Nesta imagem pode-se visualizar claramente a camada interlamelar do substrato e revestimento.

Figura 10 - Seção transversal do revestimento  $\text{Cr}_3\text{C}_2 - 25 \text{NiCr}$  sobre o substrato



Fonte: Adaptado de Marques et al. (2018)

Segundo Hidalgo et al. (2001), devido à estrutura lamelar fina, elevada microdureza e homogeneidade das fases, o  $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$  destaca-se entre os revestimentos de maior resistência ao desgaste, principalmente erosão. Além disso, a combinação destes materiais também promove elevada resistência à oxidação.

Revestimentos como o  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  apresentam boas propriedades tribológicas em ambientes agressivos de trabalho, e normalmente são utilizados em aplicações de desgaste em altas temperaturas, devido ao fato de oferecer elevada dureza, boa adesão e baixa porosidade nesta temperatura. No entanto, este compósito também proporciona boa condutividade térmica, baixa densidade, e excelente resistência ao desgaste por cavitação. Por este motivo, o  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  é aplicado em indústrias petroquímica e aeroespacial, tubulações, turbinas, entre outros (Prasanna et al., 2018; Vicenzi, 2007).

Complementando, Ding (2009) afirma também que revestimentos de  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ -NiCr normalmente são empregados em componentes que requerem alta resistência ao desgaste em altas temperaturas, condições estas que os carbonetos de tungstênio não são recomendados. No entanto, é importante destacar a resistência do  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  – NiCr quanto aos mecanismos de desgastes e corrosão, mesmo quando aplicados em baixas temperaturas.

Segundo Vicenzi (2007), os resultados indicaram que a relação entre temperatura, porosidade e composição da fase de  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  é determinante na resistência ao desgaste erosivo dos revestimentos.

É importante ressaltar que, a capacidade do revestimento em proteger o substrato contra o desgaste, é dependente não apenas da composição e microestrutura do revestimento, mas também das propriedades mecânicas do carboneto e o seu processamento (Kulu et al., 2005).

O  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  – NiCr pode ser depositado por diferentes processos de aspersão térmica, bem como, deposição por Plasma (APS), *Coldspray*, Detonação (D-Gun) e o processo de alta velocidade (HVOF) (Kovaleva et al., 2015).

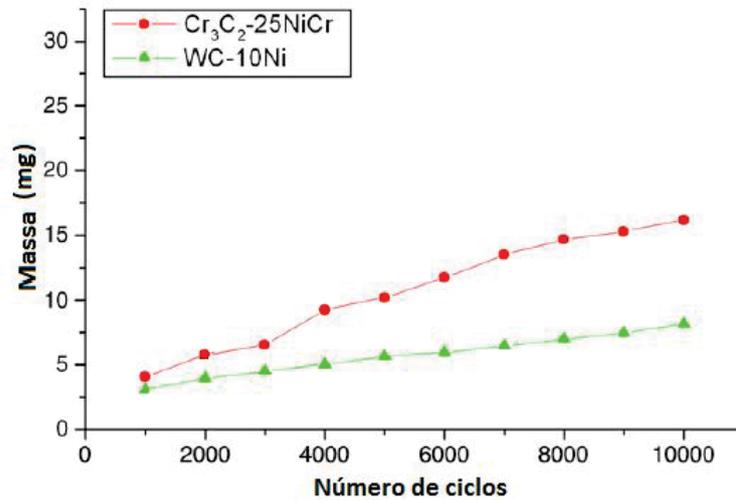
De acordo com estudo realizado por Marques et al. (2018), revestimentos a com base de carboneto, como exemplo o  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ , apresentam melhores resultados de resistência ao desgaste quando aplicados pelo processo de HVOF.

Aspersão térmica por HVOF com materiais como  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  – 25NiCr, WC-17Co e  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , geram alta resistência ao desgaste. Revestimentos estes, recomendados quando se visa formar camadas protetivas contra o efeito da cavitação. Deste modo, é recomendado a aplicação destes revestimentos no reparo de turbinas hidráulicas.

Segundo Souza et al. (2008), no tocante a resistência ao desgaste abrasivo do aço AISI 4340 revestido por HVOF, foi avaliado a resistência dos revestimentos  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  – 25NiCr e WC-10Ni. A Figura 11 demonstra a taxa da perda de massa (em

desgaste abrasivo) dos diferentes revestimentos em função do número de ciclos à fadiga.

Figura 11 - Perda de massa por desgaste abrasivo dos revestimentos ( $\text{Cr}_3\text{C}_2$  e WC) versus o número de ciclos



Fonte: Adaptado de Souza et al. (2008)

Comparativamente, revestimento de  $\text{Cr}_3\text{C}_2 - 25\text{NiCr}$  apresenta melhor resistência ao desgaste e maior coeficiente de fricção se comparado ao revestimento de  $\text{WC}-10\text{Co}_4\text{Cr}$ , quando ambos estão submetidos a temperatura de  $500^\circ\text{C}$  e  $600^\circ\text{C}$  (Zhang et al., 2017).

A tenacidade do material é algo inerente a resistência à cavitação do revestimento. Sendo assim, Vicenzi (2007) destaca que, carbonetos a base de  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  apresentam tenacidade à fratura de  $3\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ . E os grãos de  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  necessitam ser duros e suficientemente resistentes para dissipar a grande quantidade de energia do choque das partículas erodentes, evitando o micro trincamento dos grãos.

No tocante à resistência ao desgaste por cavitação do  $\text{Cr}_3\text{C}_2 - 25\text{NiCr}$ , este revestimento apresenta bom desempenho, atingindo taxas de perda de massa de  $3.8\text{ mg/h}$  quando aspergidos termicamente pelo processo de HVOF. O mesmo, pode apresentar níveis elevados de dureza, na faixa de  $1220\text{ VHN}$ , o que em conjunto com a alta coesão interlamelar e alta densidade colaboram com alta resistência do revestimento ao desgaste (BOCCANERA, 1999; SCHWETZKE, 1996).

Marques et al. (2018), em estudo das propriedades microestruturais e níveis de desgaste de revestimentos aspergidos por HVOF, destacam que o  $\text{Cr}_3\text{C}_2 - 25\text{NiCr}$  apresentou resultados satisfatórios quanto a sua resistência ao desgaste,

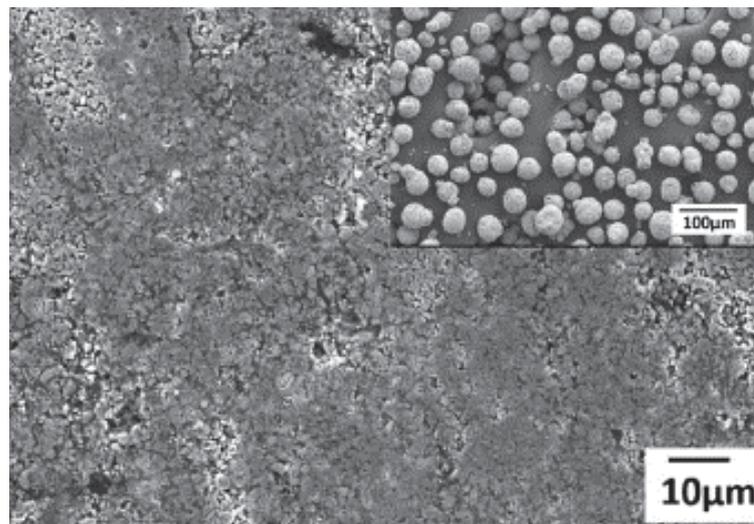
demonstrando assim, uma aplicação promissora do mesmo em componentes industriais que requerem tal resistência. Os autores também ressaltam o satisfatório desempenho do WC-10Co4Cr, que apresentou níveis de dureza superiores com taxa de desgaste inferiores ao encontrados no  $\text{Cr}_3\text{C}_2 - 25\text{NiCr}$ . Deste modo, no tópico seguinte será discutido em detalhes sobre o revestimento de Carboneto de Tungstênio WC-10Co4Cr.

### 2.2.2 Revestimento de Carboneto de Tungstênio (WC) - 10Co4Cr

O revestimento de Carboneto de Tungstênio WC – 10Co4Cr, trata-se de um compósito cerâmico metálico. A presença de partículas duras de carboneto de tungstênio (WC), juntamente a matriz metálica tenaz de cobalto e cromo (10Co4Cr), quando combinadas, oferecem boas propriedades mecânicas, como alta dureza e excelente tenacidade em um só revestimento (Ding et al., 2018).

Na Figura 12, é apresentada a microestrutura do revestimento de WC – 10Co4Cr, observa-se a presença das partículas de WC agregadas com a matriz metálica de 10Co4Cr. Os carbonetos duros se destacam nas regiões mais escuras, enquanto a matriz de 10Co4Cr é destacada na cor mais clara (Vashishtha et al., 2017).

Figura 12 – Microestrutura do revestimento WC – 10Co4Cr aspergido por HVOF.

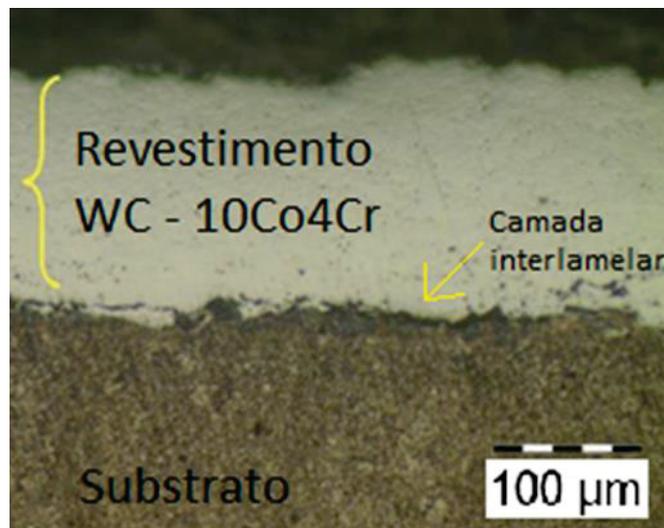


Fonte: Vashishtha et al. (2017).

Revestimentos de WC-CoCr podem ser depositados por processos de aspersão térmica como deposição por Plasma (APS), Detonação (D-Gun) e pelo processo de alta velocidade (HVOF) (Ding et al., 2018). Han et al. (2018), destaca que o ponto de fusão do WC é extremamente alto (acima de 3000 °C), desta forma, dentre os diferentes métodos, o mais indicado para deposição de revestimento WC-10Co4Cr é através do processo de aspersão térmica de alta velocidade, o HVOF.

A Figura 13, apresenta a seção transversal do revestimento de WC – 10Co4Cr aspergido termicamente pelo processo de HVOF. Nesta imagem pode-se visualizar claramente a camada interlamelar do substrato e revestimento.

Figura 13 - Seção transversal do revestimento WC – 10Co4Cr sobre o substrato



Fonte: Adaptado de Marques et al. (2018)

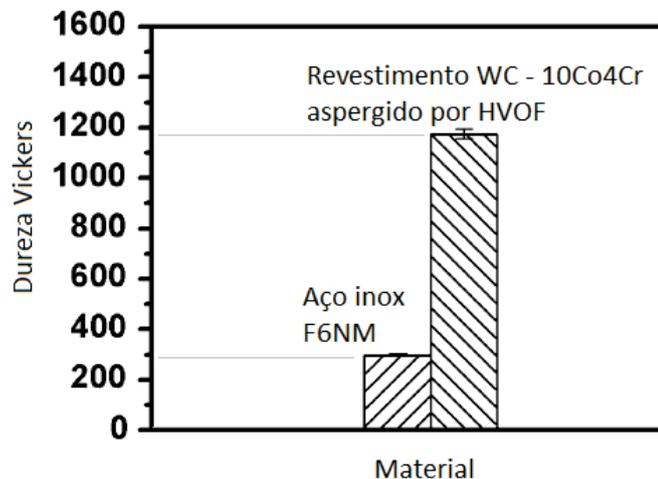
Em estudo de Marques et al. (2018), é avaliado o comportamento entre revestimentos de WC-10Co4Cr e  $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-25NiCr}$ , ambos aspergidos por HVOF. Destacam-se propriedades como porosidade e dureza entre os revestimentos, onde que o WC apresentou níveis de porosidade mais baixos quando comparado ao do

$\text{Cr}_3\text{C}_2$ , sendo 0,9% e 1,2% respectivamente. Também se ressalta a maior dureza do WC de 1300 HV.

Murugan et al. (2014), encontrou para revestimentos de WC – 10Co4Cr, níveis de 1,38% de porosidade e dureza na casa de 1300 HV. Em contrapartida, (Ding et al., 2018), encontrou microestruturas ainda mais densas, com porosidade de 0,31% e dureza acima de 1100 HV.

Segundo Cui et al. (2017), a dureza do revestimento de WC – 10Co4Cr, quando aspergido por HVOF, em escala Vickers, pode atingir níveis superiores a 1170 HV, conforme pode ser visualizado na Figura 14, onde também é apresentado um comparativo com a dureza do substrato de aço inoxidável F6NM (296,3 HV).

Figura 14- Dureza Vickers do revestimento de WC - 10Co4Cr aspergido por HVOF.



Fonte: Adaptado de Cui et al. (2017)

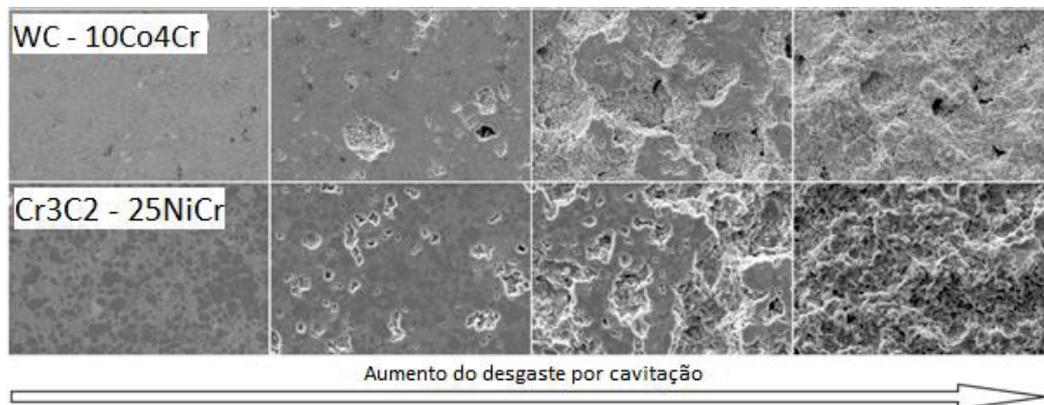
Nota-se na Figura 14, um grande acréscimo na dureza superficial da amostra de F6NM, acréscimo este de quase 300 %. No entanto, existem estudos, como Liu et al. (2014), que avaliaram, com sucesso, a presença de terras raras para

modificar as propriedades superficiais de revestimentos à base de WC, bem como refinar a microestrutura e aumentar ainda mais a dureza.

A baixa porosidade e elevada dureza do WC-10Co4Cr, colaboram diretamente na resistência a cavitação do revestimento, uma vez que tais propriedades podem efetivamente obstruir a formação e propagação de trincas geradas pelo fenômeno da cavitação (Xiang et al., 2018).

A Figura 15 retirada de Matikainen et al. (2018), apresenta um comparativo do desenvolvimento do desgaste erosivo por cavitação do WC e Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> no tempo.

Figura 15 – Desenvolvimento do desgaste por cavitação dos revestimentos de WC e Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>.

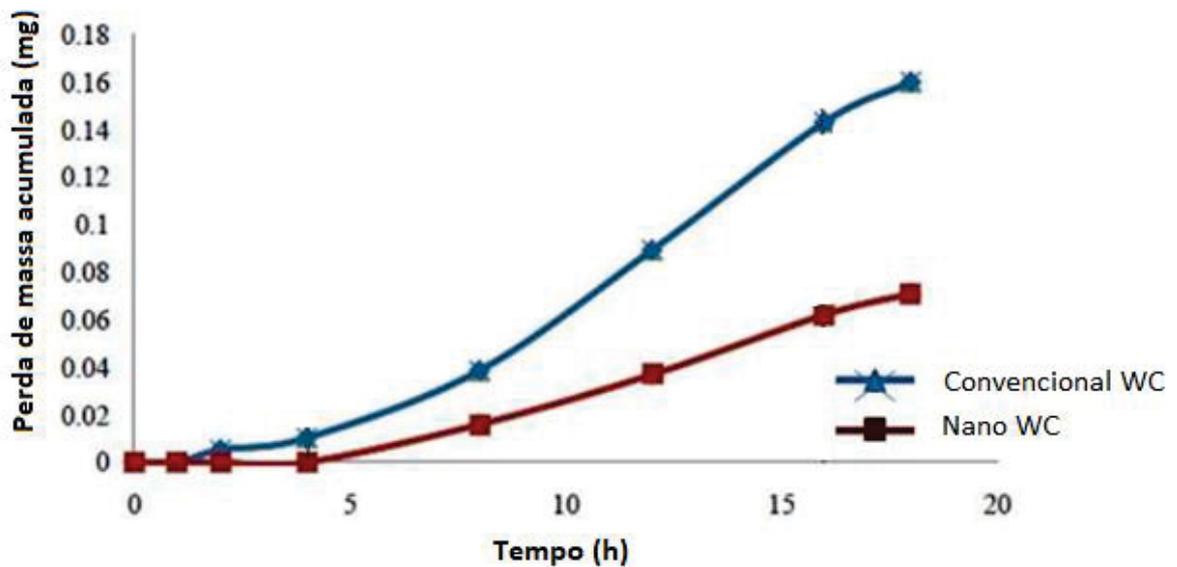


Fonte: Adaptado de Matikainen et al. (2018).

Segundo Matikainen et al. (2018), conforme a Figura 15, ambos os revestimentos de WC - 10Co4Cr e Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25NiCr, quando aspergidos por HVOF, apresentam mecanismos de desgaste por cavitação semelhante. Em ambos os mecanismos, há a formação de trincas, propagação das trincas e conseqüente remoção de material, sem que ocorra deformação plástica prévia.

Na seqüência, a Figura 16 apresenta o desgaste por cavitação do WC – 10Co4Cr. O mesmo destaca também o comparativo entre diferentes tamanhos de partículas do pó.

Figura 16 - Desgaste por cavitação do revestimento de WC – 10Co4Cr em diferentes tamanhos de partículas.



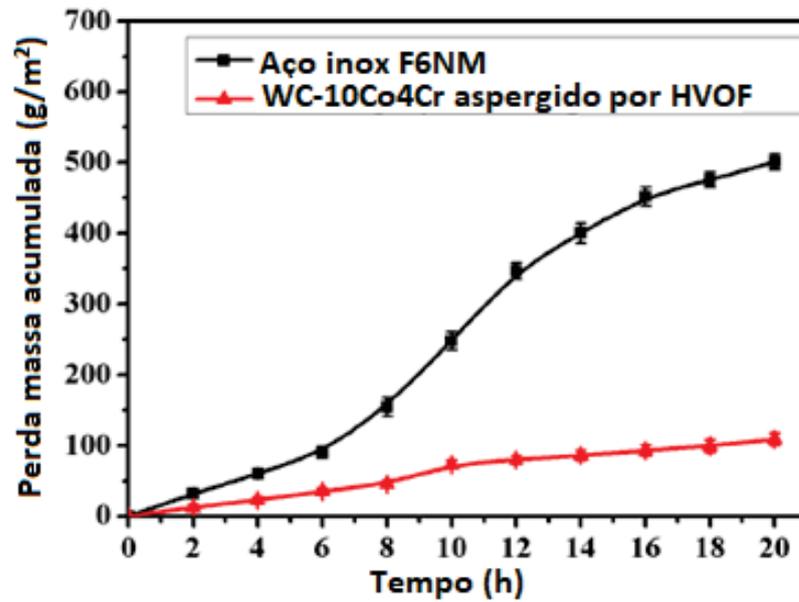
Fonte: Adaptado de Thakur e Arora (2013).

O tamanho das partículas de WC no revestimento WC - CoCr podem afetar significativamente na microestrutura e propriedades. Normalmente, as propriedades mecânicas e a resistência ao desgaste do revestimento aumentam com a diminuição do tamanho das partículas de WC. Revestimentos de WC-Co, especialmente de tamanho nanométrico, já foram aplicados com sucesso em uma ampla gama de equipamentos que requerem alta resistência ao desgaste (Ghabchi, 2011).

De modo geral, carbonetos de WC a base de cobalto e cromo apresentam excelente desempenho quanto a resistência ao desgaste e resistência à corrosão. A presença de cromo na matriz da liga, além de resultar na boa resistência à corrosão, também pode influenciar na resistência ao desgaste erosivo do revestimento (Han et al., 2018).

Cui et al. (2017) Buscaram avaliar o desempenho do carboneto de tungstênio sob desgaste erosivo, no estudo foi comparado à resistência ao desgaste do WC, aplicado por HVOF, com o substrato de aço inoxidável F6NM. Os autores destacaram um desempenho do WC muito superior ao do F6NM, conforme pode ser visualizado no Figura 17 a seguir. Ressaltando assim, o evidente acréscimo de resistência do material quando aspergidos com WC.

Figura 17- Desgaste erosivo do revestimento WC aspergido e aço inox F6NM



Fonte: Adaptado de Cui et al. (2017)

Em estudo semelhante, Escaler et al. (2003) também avaliaram o comportamento do aço inoxidável 13Cr4Ni sem revestimento e com revestimento de WC-Co, visando analisar a resistência ao desgaste de ambos, demonstrando que o aço inox sem revestimento sofreu fortes deformações plásticas e apresentou níveis elevados de desgaste. Entretanto, o revestimento de WC-Co apresentou maior resistência ao desgaste sem deformação plástica prévia, e devido ao impacto das partículas no ensaio, a liga sofreu o mecanismo de desgaste por lascamento.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

Em relação a melhoria de desempenho dos revestimentos pela otimização dos parâmetros de processo, para os dois tipos de ligas identificadas pela revisão bibliográfica, ligas a base de carbonetos de Tungstênio (WC) e carbonetos de Cromo ( $\text{Cr}_3\text{C}_2$ ), foi necessária uma abordagem generalizada, devido à grande quantidade de ligas comerciais selecionadas de cada tipo, que ainda serão apresentadas neste texto (Tabela 2). A partir da similaridade química e morfológica dos pós das ligas, foi decidido que a partir da otimização para uma das ligas, esses mesmos parâmetros seriam ideias para suas ligas similares. Ou seja, foi feito uma otimização, para cada processo, para uma liga de WC e outra para um liga de  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ .

O planejamento experimental adotado os processos HVOF foi do tipo exploratório, onde são feitas combinações de alguns parâmetros específicos para uma resposta direta de qual é o valor, ou nível, que esse parâmetro deve ser utilizado.

Nos revestimentos de Chama-pó (FS-pó), devido a não ser uma técnica clássica na aplicação de revestimentos duros, foi feito um planejamento mais elaborado, sendo este realizado pelo planejamento experimental de Taguchi, que é um método de desenho de experimentos (DOE) que permite avaliar como diferentes parâmetros afetam a média e a variância de uma característica de desempenho do processo. O delineamento de experimentos proposto por Taguchi envolve o uso de matrizes ortogonais, para organizar os parâmetros que afetam o processo, e os níveis, que devem ser variados, permitindo a coleta de dados necessários para determinar quais os fatores que mais afetam a qualidade do produto, com uma quantidade mínima de experimentos, poupando assim, tempo e recursos (LIRA, 2012; TAGUCHI, 1990; ROY, 2001).

A análise da variância sobre os dados coletados, a partir do desenho de experimentos, pode ser usada para selecionar novos valores de parâmetros, ou seja, para otimizar a característica de desempenho (LIRA, 2012).

De uma forma geral, a análise dos resultados pode ser feita de duas maneiras diferentes. Uma delas é mediante uma série de gráficos e a outra, mediante a análise da variância.

As respostas dadas pelo planejamento de Taguchi permitem verificar, em forma de gráficos, a influência que todos os fatores estudados exercem sobre as

médias, a intensidade dessa influência e qual nível influencia positivamente sua resposta. Já a análise da variância, resultante da comparação das médias das respostas do arranjo ortogonal, calculado sobre a soma das respostas para cada nível em cada fator, revela se existe significância nos fatores, permitindo assim haver uma validação estatística da interpretação dos gráficos de influência (LIRA, 2012; TAGUCHI, 1990). Ou seja, é possível analisar cada fator independentemente para a mesma resposta, bem como qual o nível deste fator que produz o melhor resultado nesta resposta.

Para esta condição, a análise de variância permite identificar a significância de cada fator sobre a sua variável resposta, facilitando assim a identificação de qual fator exerce de fato alguma influência significativa sobre o que se está estudando.

O arranjo ortogonal de Taguchi também permite fazer um ranqueamento destes fatores a fim de que seja possível identificar qual é o mais influente entre os que se mostraram significativos, isto é possível através das diferenças entre as médias das respostas de cada nível para cada fator, ou seja, a diferença entre os efeitos de cada nível. Junto ao ranqueamento, as análises gráficas destes efeitos permitem que seja facilmente identificado qual é o melhor nível de cada fator.

Então, após o resultado da análise de variância apresentar quais fatores são significativos, o ranqueamento apresenta qual é o fator de maior influência para a minha resposta e a análise gráfica permitir identificar qual é o melhor nível de cada fator. É necessário identificar a diferença significativa entre estes níveis, ou seja, se existe diferença estatística entre os níveis. Para tanto é necessário um teste de comparação entre níveis, sendo este chamado de teste de diferença honestamente significativa (Honestly Significant Difference - HSD) de Tukey ou simplesmente teste Tukey.

### 3.1 MATERIAIS COMERCIAIS SELECIONADOS PARA APLICAÇÕES DOS REVESTIMENTOS

A Tabela 2 apresenta a composição química dos pós testados na deposição dos revestimentos pela técnica HVOF e chama-pó.

Tabela 2– Composição química das ligas em pó utilizados na pesquisa.

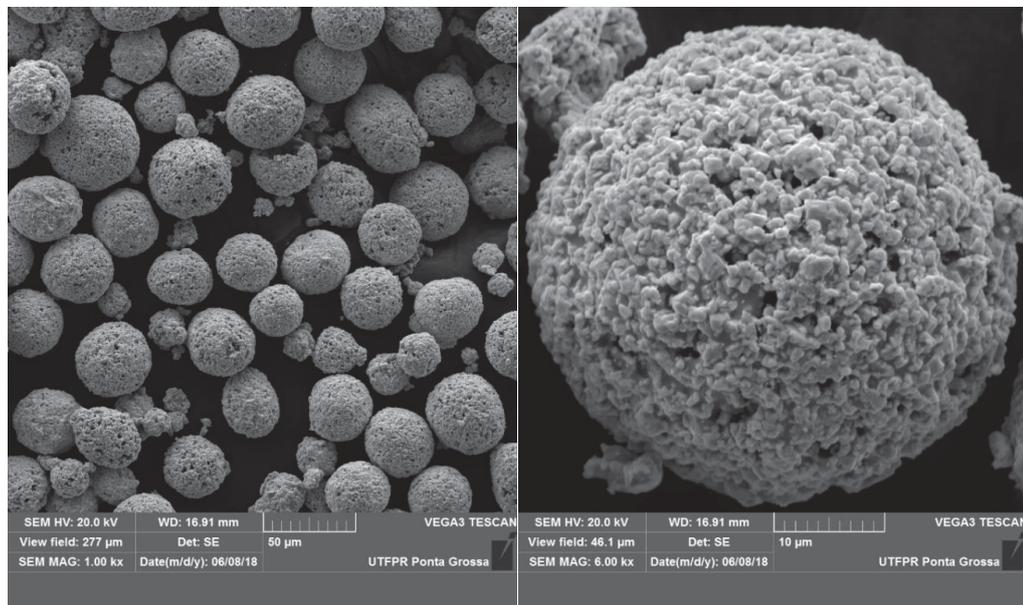
OERLIKON WOKA 7205	Cr3C2 25(Ni 20Cr)
METCO 5546NS	Cr3C2 25(NiCrAlY)
METCO 82VF-NS	Cr3C2 7(Ni 20Cr)
AMDRIY 367	Cr3C2 10(Ni 20Cr)
OERLIKON WOKA 3652	WC 10Co4Cr
OERLIKON WOKA 3305	WC 10Ni
OERLIKON WOKA 3105	WC 12Co

Fonte: O autor (2020).

Dos pós descritos na Tabela 2, a liga WC 10Co4Cr foi a que mais se adequou à deposição pelo processo por chama, portanto foi selecionado para a aplicação neste trabalho. As ligas foram originalmente projetadas para aplicação por HVOF e as outras ligas mostraram-se inviáveis para aplicação pelo processo chama-pó, com exceção da liga WOKA 7205, que será abordada em outro estudo.

O pó utilizado na deposição da liga WC 10Co4Cr é do tipo aglomerado e sinterizado, Figura 18. Nesta Figura é possível visualizar os carbonetos de tungstênio, mais claro, e a matriz de cobalto e cromo, mais escura.

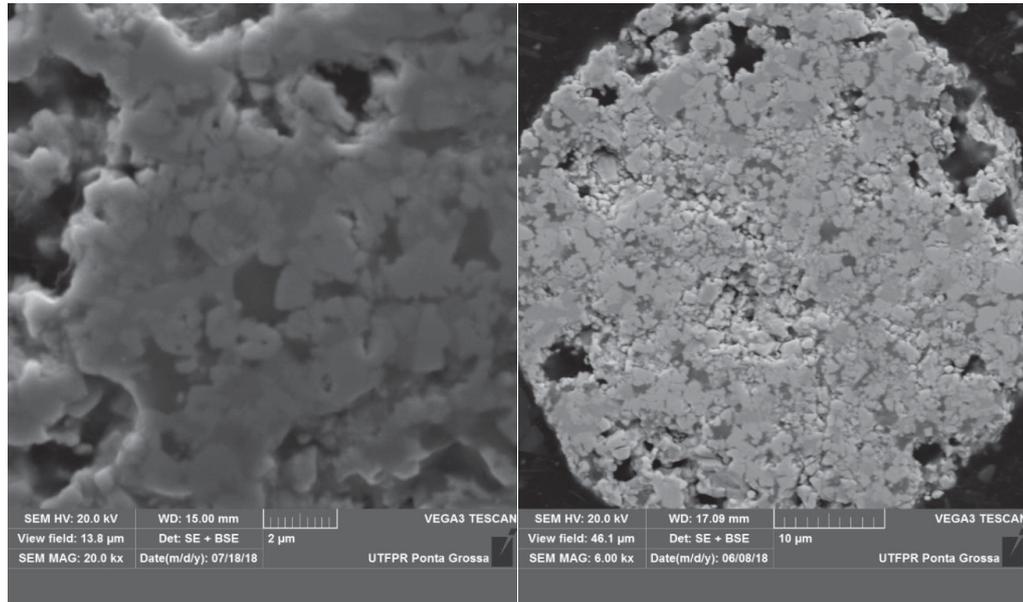
Figura 18 - Imagens do pó utilizado (WC 10Co4Cr) obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura. Ampliação: (a) 1000x, (b) 6000x.



Fonte: O autor (2020).

É possível visualizar a seção transversal do pó da liga WC 10Co4Cr na Figura 19. Nesta Figura fica mais clara a presença dos carbonetos de tungstênio mais escuro e a matriz de Co e Cr mais escura.

Figura 19. Imagens do pó utilizado (WC 10Co4Cr) após preparação metalográfica obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura. Ampliação: (a) 20000x, (b) 6000x.



Fonte: O autor (2020).

### 3.2 APLICAÇÕES DAS LIGAS PELO PROCESSO DE ASPERSÃO TÉRMICA CHAMA-PÓ (FS-PÓ)

As deposições realizadas pelo processo a Chama-pó foram executadas no Laboratório de Aspersão Térmica e Soldagens Especiais – LABATS, da UFPR, situada na cidade de Curitiba-PR. Também foram utilizadas chapas de aço baixo carbono (SAE 1020) como substrato com as seguintes dimensões: 50 mm de largura por 200mm de comprimento e 4,5 mm de espessura, considerando que os mecanismos de aderência por ancoramento mecânico dos revestimentos depositados por FS-pó não apresentam diferença significativa nos resultados de adesão quando comparados a revestimentos depositados sobre aço inoxidável, com parâmetros de rugosidade similares (SABER, 2017).

O equipamento utilizado para a deposição do revestimento foi a pistola de alimentação por gás de transporte, modelo 6PII, com alimentador de pó modelo 5MPE, ambos da Sulzer Metco. A deposição dos revestimentos foi realizada manualmente por um operador qualificado e experiente, o que garantiu a homogeneidade das camadas depositadas.

A Tabela 3 apresenta o conjunto de parâmetros utilizado para as deposições por FS-pó.

Tabela 3 - Parâmetros de processo utilizados nas otimizações dos revestimentos por Chama-pó

PARÂMETROS DE PROCESSO	VALORES
Combustível	Acetileno (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> )
Pressão do combustível (MPa)	0,103 (15 PSI)
Fluxo combustível (m <sup>3</sup> /h)	1,133 e 1,359 (40 e 48 SCFH)
Oxidante	Oxigênio (O <sub>2</sub> )
Pressão de oxidante (MPa)	0,344 (50 PSI)
Fluxo de oxidante (m <sup>3</sup> /h)	2,039 e 2,265 (72 e 80 SCFH)
Fluxo total de combustão (m <sup>3</sup> /h)	0,398 (120 SCFH)
Gás de arraste	Nitrogênio (N <sub>2</sub> )
Pressão do gás de arraste (MPa)	0,206 (30 PSI)
Vazão de gás de arraste (m <sup>3</sup> /h)	0,425 (15 SCFH)
Taxa de alimentação (g/min)	35 e 45
Distância de deposição (mm)	150 e 250
Pré-aquecimento (°C)	150

Fonte: O autor (2020).

### 3.2.1 Otimização de parâmetros para Chama-pó (FS-pó)

A otimização dos parâmetros para FS-pó foi em função da relação de combustão, da taxa de alimentação do pó e distância de aplicação. A relação de combustão foi dada pela variação da razão de fluxo de combustível e oxigênio, mantendo um fluxo total de 0,398 m<sup>3</sup>/h (120 SCFH). A Tabela 4 apresenta as combinações entre parâmetro e níveis conforme arranjo ortogonal L4 de Taguchi.

Tabela 4 - Arranjo Ortogonal L4 de Taguchi com os parâmetros de processo utilizados na otimização dos revestimentos.

EXPERIMENTO	RELAÇÃO DE COMBUSTÃO(O <sub>2</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> )*	TAXA DE ALIMENTAÇÃO (G/MIN)	DISTÂNCIA DE ASPERSÃO (MM)
B1	2	35	150
B2	2	45	250
B3	1,5	35	250
B4	1,5	45	150

\* 2 = 80/40 SCFH; 1,5 = 72/48 SCFH.

Fonte: O autor (2020).

A Tabela 5 mostra o nome adotado para as amostras, nome comercial e composição química da liga.

Tabela 5 - Nome e composição química da liga otimizadas para o processo Chama-pó.

AMOSTRA	PRODUTO	WC	Cr	Co
B	WOKA 3652	Restante	4	10

Fonte: O autor (2020).

Todas as análises citadas foram realizadas com o auxílio de um software de análise estatística, o Minitab® 16.1.0, o qual permite realizar diretamente o planejamento de Taguchi, bem como facilita a construção dos gráficos.

### 3.2.2 Revestimentos otimizados de Chama-pó (FS-pó)

Após as análises de caracterização dos revestimentos, foi possível obter uma combinação de parâmetros que produziu revestimentos de melhor qualidade. Com esses parâmetros otimizados foram feitas novas deposições para realizar os ensaios de desgaste.

### 3.3 PREPARAÇÃO METALOGRÁFICA

A preparação metalográfica foi realizada a partir da retirada de uma parcela transversal e longitudinal das amostras, em cortadeira de precisão da marca Buehler ISOMET 4000 (utilizando disco abrasivo), Figura 20. Após o corte, as amostras foram então embutidas em resina com carga mineral para garantir uma melhor estabilidade dimensional e não promover a ruptura do revestimento cerâmico, para posterior lixamento lixas de granulometrias: 600, 800 e 1200 mesh aplicadas progressivamente. O polimento foi realizado com suspensões de diamante 3 e 0,25  $\mu\text{m}$ , e sílica coloidal 0,04  $\mu\text{m}$ , ambos os processos de lixamento e polimento utilizaram politriz automática Buehler Vector (Figura 21).

Figura 20. Cortadeira de precisão Isomet 4000.



Fonte: O autor (2020).

Figura 21 - Lixadeira e poltriz Buheler Beta.



Fonte: O autor (2020).

### 3.4 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

Para a caracterização por Microscopia Eletrônica de Varredura, MEV, e análise de composição química foram obtidas imagens através do microscópio eletrônico de varredura *Vega 3 Tescan* (Figura 22) das amostras que foram limpas por ultrassom com a utilização do equipamento da marca *Thornton* modelo T7 por aproximadamente cinco minutos.

Figura 22 - Microscópio eletrônico de varredura Tescan Vega 3.



Fonte: O autor (2020).

### 3.4.1 Análise da Porosidade Microscópio Ótico e Microscópio Eletrônico de Varredura

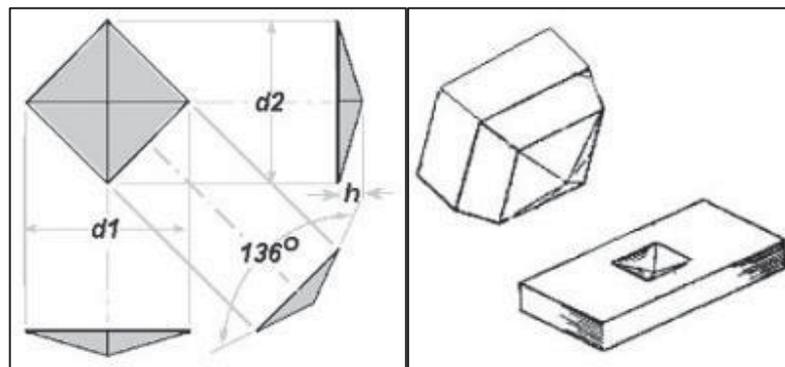
A análise de porosidade dos revestimentos foi realizada a partir de imagens obtidas em Microscópio Ótico (MO) da marca Olympus BX60 e Zeiss A2.m e com Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) da marca TESCAN modelo VEGA 3 a partir das técnicas SE – *SecondaryElectron* e BSE – *BackscatteringElectron*). Para as avaliações de porosidade utilizaram o software de análise de imagens AnalySIS e AxioVision.

Para avaliar a porosidade e fração de carbonetos de cromo, foi realizado o tratamento das imagens, com alteração para tons de cinza e controle de contraste. Em seguida foi estabelecido o limiar das fases cerâmicas e de poros, com isso, foi possível calcular a porcentagem das fases medidas.

### 3.5 ENSAIO DE MICRODUREZA VICKERS

Foram realizadas medições de microdureza Vickers, em um Microdurômetro Shimadzu HMV-20G, com aplicação de carga de 300 gf (gramas-força) ou 2,94 N (Newtons), durante um período de 15 segundos. A técnica se dá a partir do indentador, onde a pirâmide de diamante Vickers possui ângulo de  $136^\circ$  entre faces opostas (Figura 23)

Figura 23 – Indentador Vickers utilizado.



Fonte: O autor (2020)

As medições foram realizadas transversalmente ao revestimento, sendo indicado o valor médio e o desvio padrão de 10 indentações. Os ensaios foram realizados segundo norma ASTM E384 - *Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials*.

### 3.6 PROCEDIMENTOS PARA OS ENSAIOS DE DESGASTE

Os ensaios de desgaste possuem normas específicas para cada tipo de desgaste. Entretanto, alguns parâmetros foram definidos de maneira que a comparação entre eles se torne possível. Os ensaios foram realizados seguindo um padrão, obedecendo o intervalo de tempo na ordem de  $2n$  unidades de tempo, onde  $n$  variou de 0 a 7. Devido a agressividade do ensaio de erosão,  $n$  variou de -3 a 2, totalizando 120 segundos (2 minutos) de ensaio, como representado na Tabela 6.

Tabela 6–Metodologia utilizada para ensaio de desgaste

Intervalo de tempo entre testes (min)	0	1	1	2	4
Tempo total de testes (min)	0	1	2	4	8

Fonte: O autor (2020).

Esta metodologia foi seguida tendo como base o trabalho anterior realizado no Centro de Aspersão Térmica em Stony Brook, por Guo (1988). Além disso, os procedimentos para a medição da perda de massa acumulada, perda volumétrica e o cálculo da taxa de desgaste também foram os mesmos para todas as amostras.

#### 3.6.1 Medições da Perda de Massa Acumulada

As amostras a serem ensaiadas passaram por medição de massa antes e após cada intervalo de ensaio, para a determinação da perda de massa acumulada. Foi realizada a limpeza por ultrassom das amostras antes da pesagem, a fim de eliminar partículas de material sobre a superfície e contornos das amostras. A limpeza por ultrassom foi realizada em equipamento da marca Thornton, modelo T7, por aproximadamente 5 minutos. A medição foi, então, realizada após a limpeza e

secagem das amostras em balança analítica de precisão Shimadzu modelo AUX 220 com o intuito de verificar a perda de massa proveniente do ensaio de desgaste.

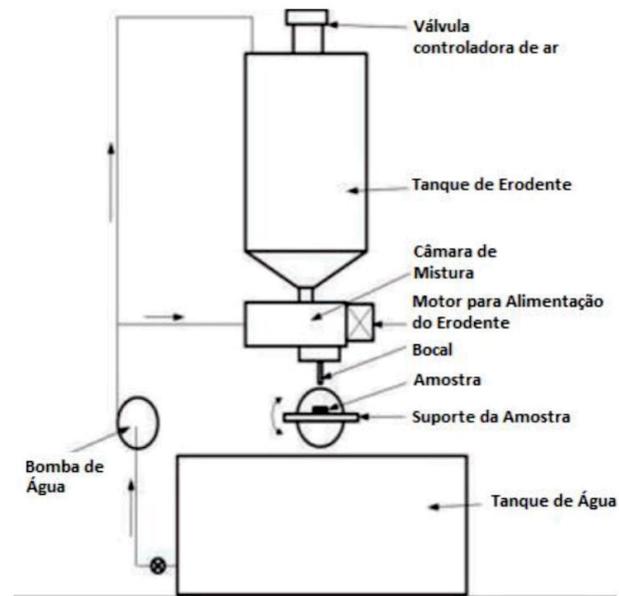
Para evitar problemas devido à absorção da umidade, no caso da cavitação, ou a presença de algum sedimento, no caso da abrasão e erosão, as amostras passaram pelo processo de limpeza por ultrassom e de secagem, à temperatura ambiente, por aproximadamente 24 horas, para posteriormente se realizar a medição da massa.

### 3.6.2 Ensaio de Erosão por Jato De Lama (Slurry)

O ensaio de desgaste erosivo por jato de Slurry foi realizado com o auxílio do equipamento DUCOM- Slurry Jet Erosion Tester, localizado na UTFPR-PG. O equipamento para ensaio consiste das seguintes unidades: uma câmara de mistura onde as partículas de areia e água são misturadas; um bocal de saída com diâmetro de 4 mm; uma placa de suporte da amostra onde a mesma pode ser exposta ao jato de slurry sob diferentes ângulos (PAWAR et al., 2016). O desenho esquemático do ensaio por jato de slurry é apresentado na Figura 24, destacando os principais componentes do equipamento, Figura 25 e porta amostra, Figura 26.

Variáveis como velocidade do jato, ângulo de impacto, tipo e tamanho do erodente, concentração do *slurry* e tempo de ensaio podem ser controladas durante o ensaio. Deste modo, neste trabalho será realizado o ensaio por jato de *slurry* segundo dados contidos na Tabela 7 a seguir. Durante os ensaios de *slurry*, após cada intervalo de tempo, as amostras são limpas, secas e então pesadas.

Figura 24. Diagrama esquemático do equipamento de Ensaio por Jato de Lama.



Fonte: Adaptado de Pawar et al. (2016)

Fonte: O autor (2020).

Figura 25- Slurry Jet Erosion DUCOM



Fonte: O autor (2020).

Figura 26- Porta amostra confeccionado para ensaios em revestimentos aspergidos.



Fonte: O autor (2020).

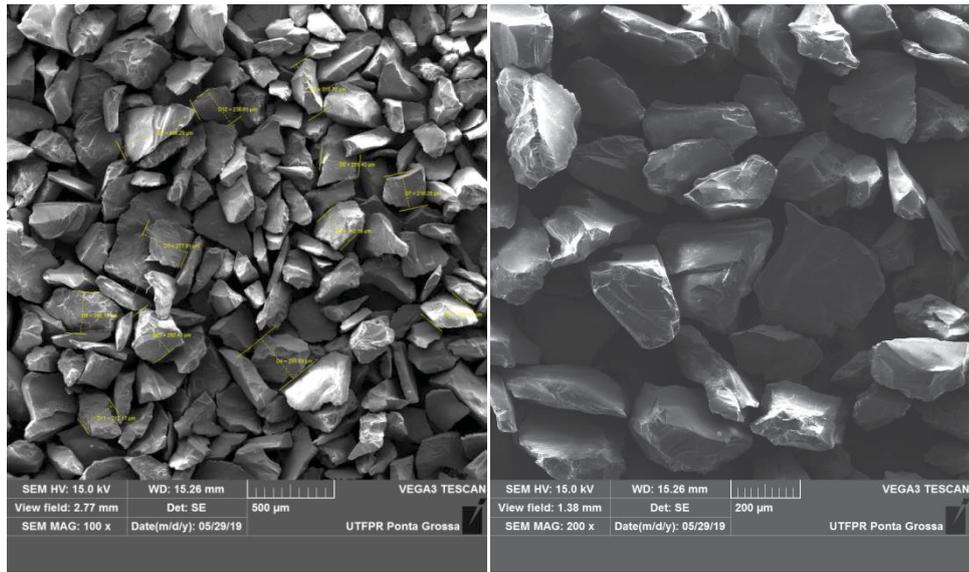
Tabela 7 - Parâmetros do ensaio por jato de *slurry*

<b>Parâmetro</b>	<b>Especificação</b>
Equipamento	DUCOM - Slurry Jet Tester
Ângulo de impacto	90°
Tipo do erodente	Óxido de silício
Tamanho do erodente	200<g<500µm
Concentração de erodente	10 e 30 kg/m <sup>3</sup>
Distância entre bocal e amostra	50 mm
Tempo do ensaio	30 seg, 1 min, 2 min, 4 min e 8 min.

Fonte: O autor (2020)

Na Figura 27 é observada a imagem por MEV da areia usada no Slurry Jet Erosion, sendo que esta areia apresenta um tamanho médio de partícula de 250 µm, com formato angular. Este formato apresenta um potencial maior de dano, devido a presença de arestas mais pontiagudas.

Figura 27- Imagens da areia utilizada no ensaio de desgaste por Slurry Jet Erosion.



Fonte: O autor (2020).

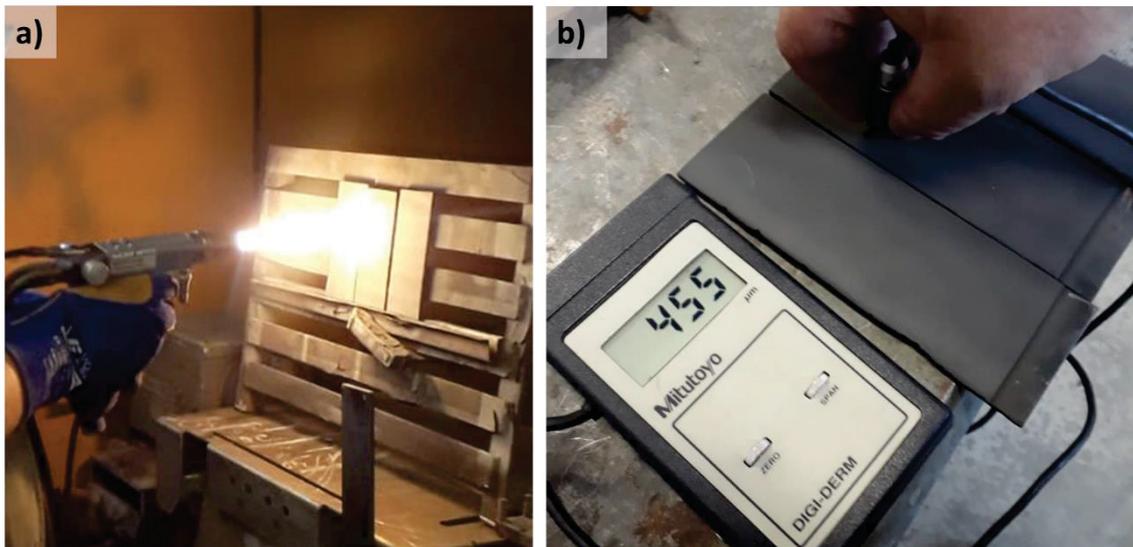
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A sequência de resultados será apresentada primeiramente a caracterização dos revestimentos de Chama-pó (FS), avaliando-se em seguida cada propriedade estudada no planejamento experimental de Taguchi. Na sequência é determinada a configuração mais adequada, sendo esta utilizada para a execução do ensaio de desgaste por lama (slurry).

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS REVESTIMENTOS DEPOSITADOS POR CHAMA-PÓ

Na Figura 28(a) pode ser visto a preparação das amostras na etapa de aplicação dos revestimentos e em (b) as amostras já revestidas sendo inspecionadas em relação a espessura da camada.

Figura 28 – A) Aplicação dos revestimentos. B) Medição de espessura.

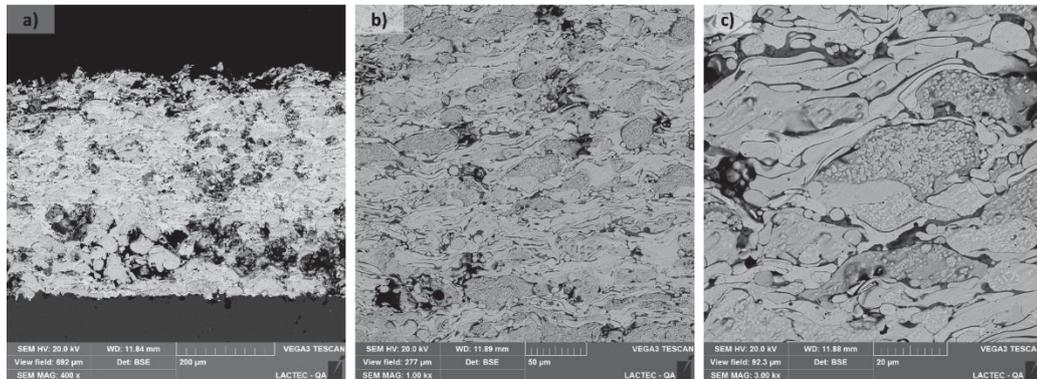


Fonte: O autor (2020).

Os revestimentos depositados por chama-pó apresentam uma morfologia tipicamente lamelar, com panquecas bem alongadas, com filmes de óxidos interlamelares (TREVISAN, 2007; PAREDES, 2012). De forma geral, essas características podem ser observadas para todos os revestimentos depositados nesta etapa, nas Figura 29, Figura 30, Figura 31 e Figura 32 os revestimentos de WC.

Figura 29 – MEV da amostra B1 - WOKA 3652 (WC10Co4Cr) depositado por Chama-pó. Em a) visão geral, em b) detalhe com ampliação de 1000x e em c) com 3000x.

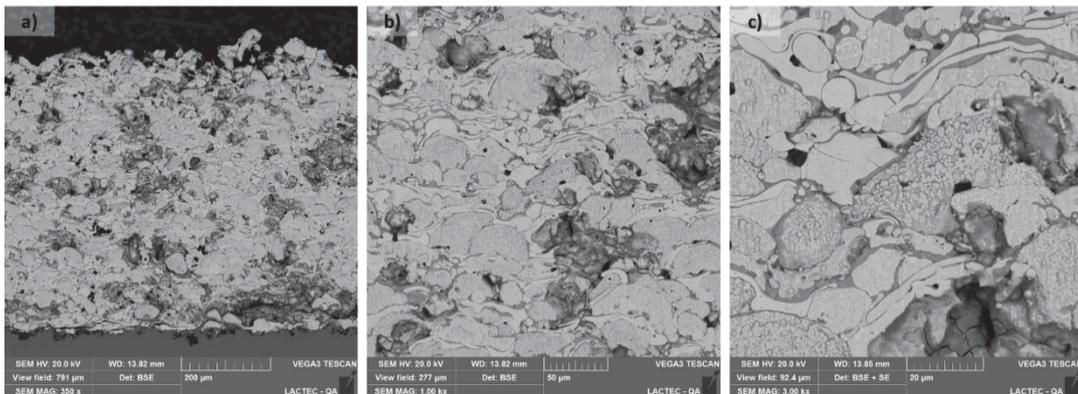
Amostras B1 - WOKA 3652 (WC10Co4Cr)



FONTE: O autor (2019).

Figura 30 – MEV da amostra B2 - WOKA 3652 (WC10Co4Cr) depositado por Chama-pó. Em a) visão geral, em b) detalhe com ampliação de 1000x e em c) com 3000x.

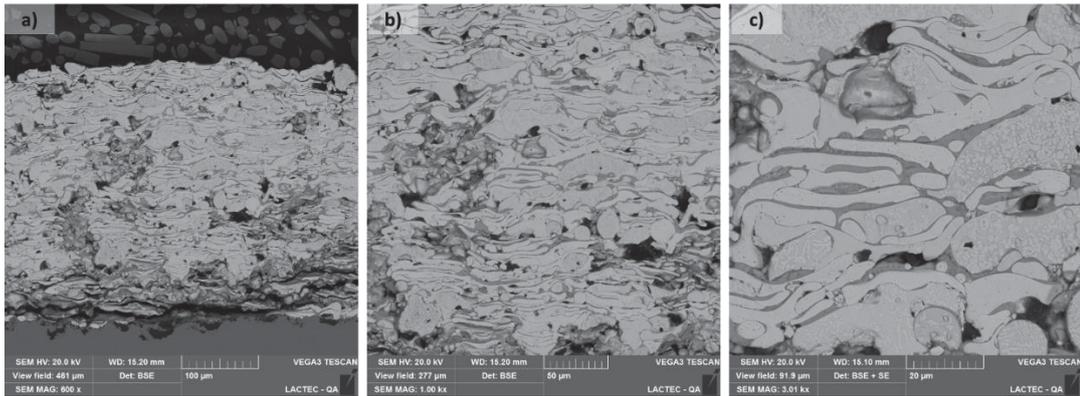
Amostras B2 - WOKA 3652 (WC10Co4Cr)



Fonte: O autor (2019).

Figura 31 – MEV da amostra B3 - WOKA 3652 (WC10Co4Cr) depositado por Chama-pó. Em a) visão geral, em b) detalhe com ampliação de 1000x e em c) com 3000x.

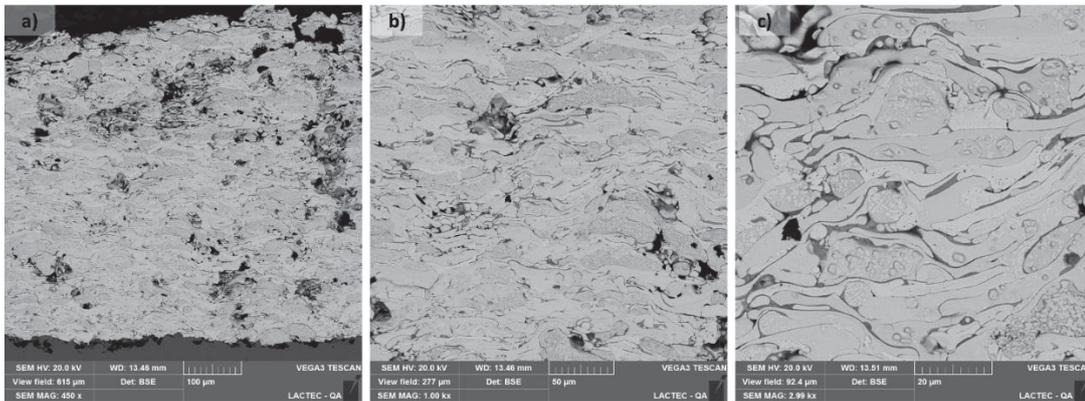
Amostras B3 - WOKA 3652 (WC10Co4Cr)



FONTE: O autor (2019).

Figura 32 – MEV da amostra B4 - WOKA 3652 (WC10Co4Cr) depositado por Chama-pó. Em a) visão geral, em b) detalhe com ampliação de 1000x e em c) com 3000x.

Amostras B4 - WOKA 3652 (WC10Co4Cr)



FONTE: O autor (2019)

#### 4.1.1 Resultados de dureza

Na Tabela 8 encontram-se os resultados da dureza, foram feitos também os gráficos de boxplot (Figura 33).

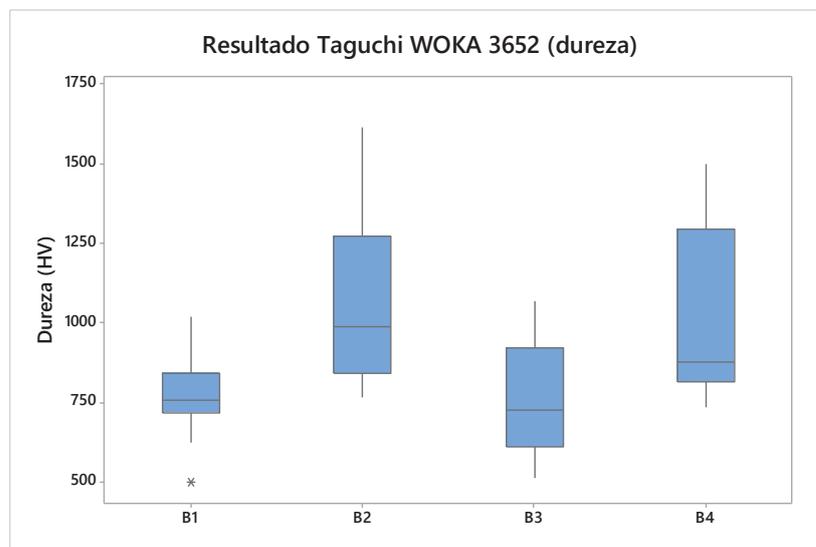
Tabela 8 - Dureza

Dureza (HV 300gf)				
	B1	B2	B3	B4
	706	989	646	735
	500	828	579	932
	719	802	727	862
	755	766	1070	855
	936	851	855	844
	802	1002	517	876
	769	844	609	894

	834	841	615	775
	624	858	515	815
	997	1085	609	809
	757	1267	894	1297
	755	1273	825	1325
	841	1338	924	1325
	755	1618	1032	1499
	1019	1445	1028	1141
Media	784,6	1053,8	763,0	998,9
Desvio	129,0	260,7	188,4	238,8

Fonte: O autor (2020).

Figura 33 - Boxplot dureza



Fonte: O autor (2020).

#### 4.1.2 Resultados de Oxidação.

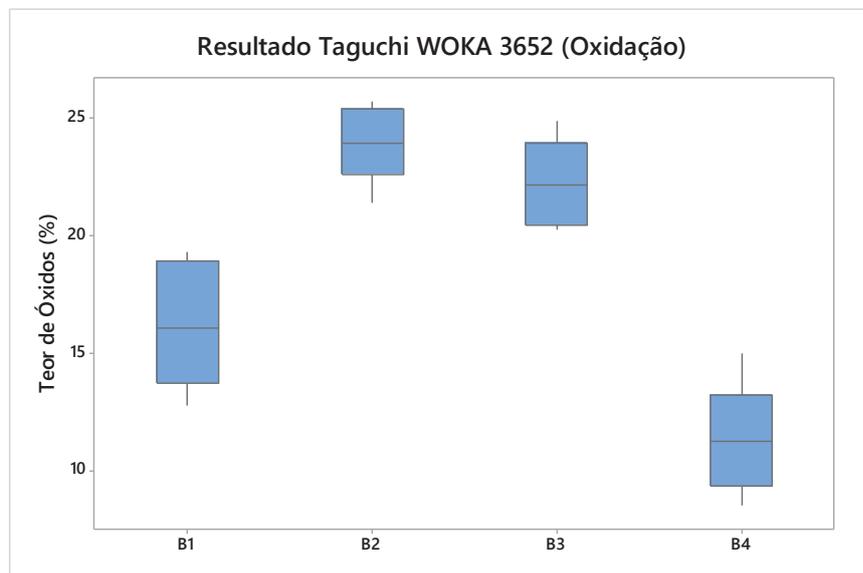
Na Tabela 9 encontram-se os resultados da dureza, foram feitos também os gráficos de boxplot (Figura 34).

Tabela 9 - Teor de óxidos

	Óxidos (%)			
R1	19,3	21,4	24,89	8,55
R2	14,76	25,69	23,03	10,18
R3	12,75	23,78	20,62	14,98
R4	18,49	25,11	20,24	11,44
R5	16,09	23,95	22,16	11,25
Média	16,28	23,99	22,19	11,28
Desvio	2,68	1,65	1,89	2,37

Fonte: O autor (2020).

Figura 34 - Boxplot oxidação



Fonte: O autor (2020).

#### 4.1.3 Resultados de Porosidade

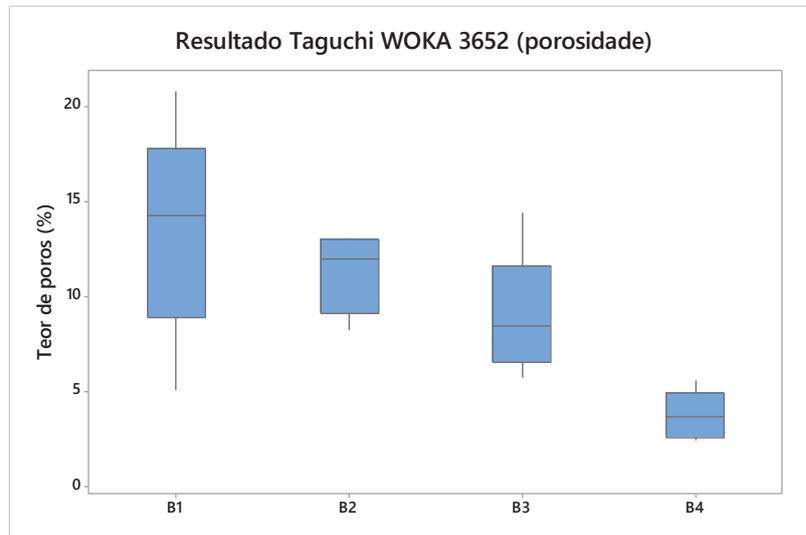
Na Tabela 10 encontram-se os resultados do teor de poros, foram feitos também os gráficos de boxplot (Figura 35).

Tabela 10 - Nível de porosidade

	Porosidade (%)			
R1	5,07	10,04	7,4	4,26
R2	14,23	11,93	14,42	2,43
R3	14,76	13,04	8,44	5,6
R4	20,77	12,89	5,7	2,71
R5	12,74	8,22	8,75	3,7
Média	13,51	11,22	8,94	3,74
Desvio	5,63	2,06	3,29	1,28

Fonte: O autor (2020)

Figura 35 - Boxplot porosidade



Fonte: O autor (2020).

#### 4.1.4 Resultados de Aderência

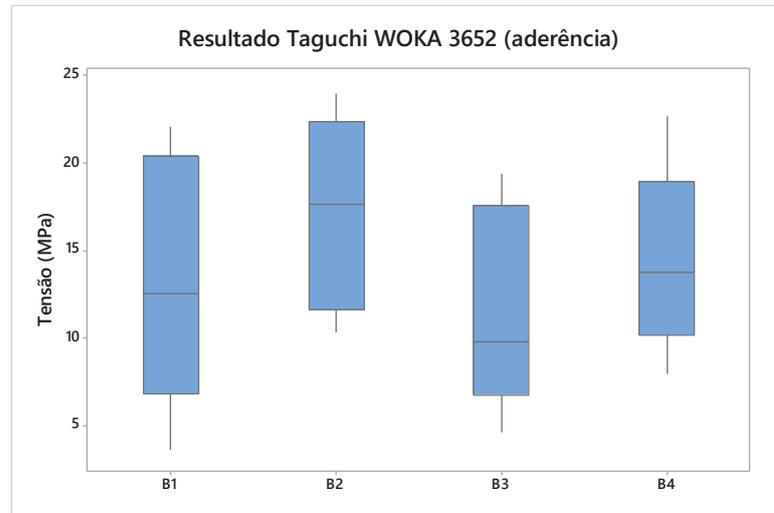
Na Tabela 11 encontram-se os resultados da aderência, foram feitos também os gráficos de boxplot (Figura 36).

Tabela 11 - Resultados de aderência

<b>Aderência</b>				
	B1	B2	B3	B4
	3,61	10,29	4,63	7,94
	9,98	12,94	8,84	12,42
	12,52	17,66	9,78	13,74
	18,69	20,8	15,76	15,16
	22,06	23,92	19,36	22,68
Média	13,372	17,122	11,674	14,388
Desvio	7,267921	5,572147	5,85249349	5,367096

Fonte: O autor (2020).

Figura 36 - Boxplot de aderência



Fonte: O autor (2020).

#### 4.2 INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE DEPOSIÇÃO PARA CHAMA-PÓ

Para identificar qual parâmetro exerce maior influência, é possível classificar (ranquear) cada fator em função da diferença (delta) entre os valores médios de cada nível, tornando assim conhecido qual fator é mais influente em função desta maior diferença. A Tabela 12 reúne e resume todos os ranqueamentos para as médias dos efeitos principais para todas as caracterizações realizadas (ranque igual a 1 significa que este é o fator mais influente).

Tabela 12 - Ranque de influência dos parâmetros para a ligas depositados por Chama-pó.

Liga	WOKA 3652 (WC10Co4Cr)		
	Relação de combustão	Taxa de alimentação	Distância
Porosidade	2	3	1
Oxidação	1	2	3
Aderência	2	1	3
Dureza	2	1	3
Rank Geral	2	1	3

Fonte: O autor (2020).

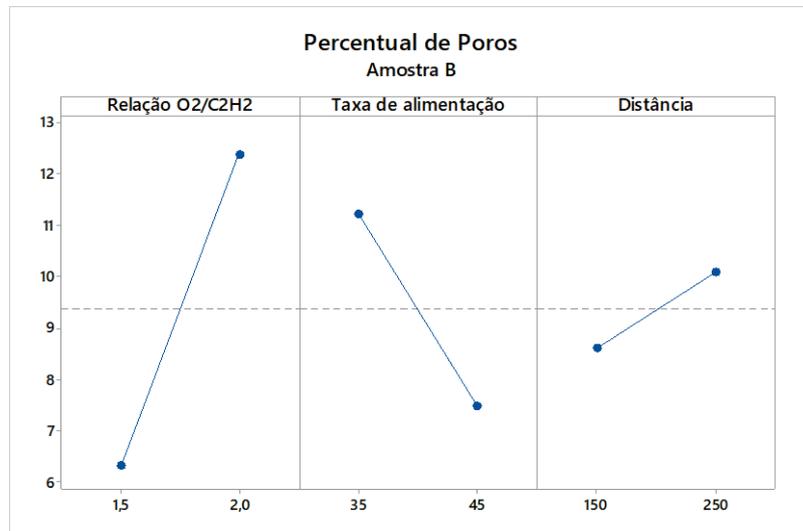
Para a liga utilizada o fator 'Taxa de alimentação' se mostrou como de maior influência, porém o segundo mais influente foi a 'Relação de combustão', sendo a 'Distancia' o fator menos influente.

Esse tipo de comportamento, onde a taxa de alimentação se mostra como fator mais influente já foi observado no estudo realizado por Costa (2017), onde foi observado que há uma grande influência da área total exposta do material, que de fato vai depender da relação entre a quantidade de partículas aspergidas em função da granulometria e capacidade de arraste, ou seja, quanto menor a quantidade de pó por minuto, significa um volume menor de pó, conseqüentemente menos áreas para dividir o oxigênio disponível, que vai resultar em uma maior oxidação geral do revestimento, prejudicando a porosidade e, conseqüentemente, a aderência. Isso é confirmado na Figura 38, onde é visto que há menos oxidação para a maior taxa de alimentação do pó.

O planejamento experimental de Taguchi permite uma análise gráfica dos efeitos principais sobre as médias da característica analisada, facilitando o entendimento do efeito do nível de cada parâmetro tem sobre essa resposta.

A Figura 37 apresenta graficamente a influência de cada parâmetro sobre a porosidade, ou seja, o efeito de cada nível para cada fator sobre o percentual de porosidade nos revestimentos. Neste resultado a relação de combustão mostra-se como o fator mais influente, sendo que quanto menor essa relação, menor a porosidade, o que provavelmente ocorre devido à maior energia proporcionada pela combustão estar mais próxima do ponto estequiométrico, o que resulta em maior aquecimento das partículas. A taxa de alimentação também se mostrou um fator influente e como esperado a maior taxa de oxidação reduziu a porosidade, devido ao mecanismo de oxidação e ancoramento das partículas.

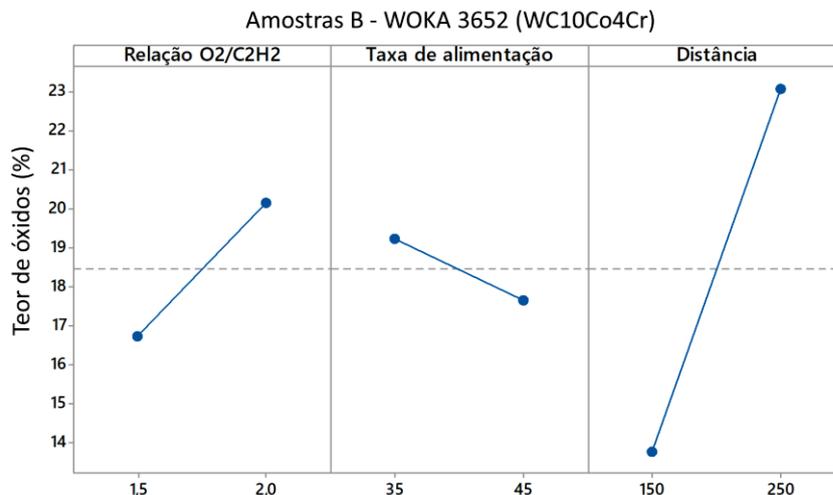
Figura 37 - Efeitos principais sobre as médias do percentual de porosidade dos revestimentos de chama-pó.



Fonte: O autor (2020).

A Figura 38 apresenta graficamente a influência de cada parâmetro, ou seja, o efeito de cada nível para cada fator sobre o teor de óxidos. A distância de deposição se mostrou como o fator mais influente e o teor de óxidos aumentou significativamente conforme a distância aumenta, o que pode ser explicado pelo fato que com uma distância maior uma partícula permanece maior tempo exposta ao oxigênio da chama. O outro fator influente foi a relação de combustão, que também se comportou como previsto, visto que a chama mais rica em oxigênio promoveu maior oxidação

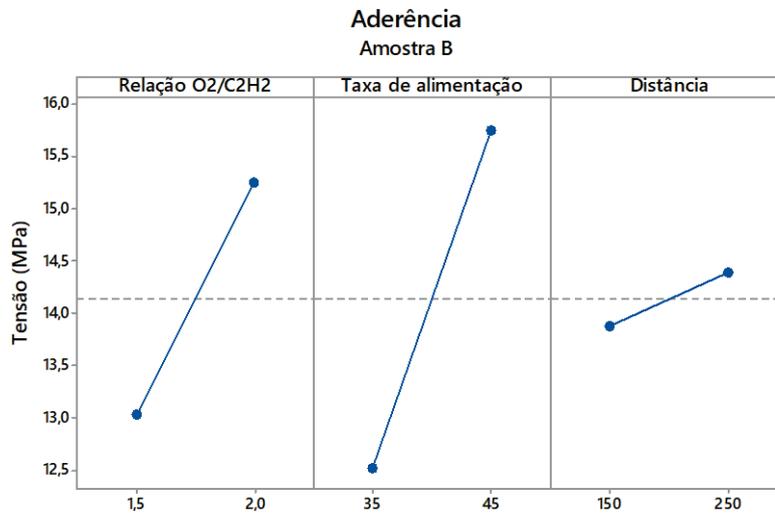
Figura 38 - Efeitos principais sobre as médias de teor de oxidação dos revestimentos de chama-pó.



Fonte: O autor (2020).

A Figura 39 apresenta graficamente a influência de cada parâmetro, ou seja, o efeito de cada nível para cada fator sobre a tensão de ruptura dos revestimentos. Os desvios padrão das medições de aderência foram muito grandes, então apesar de visualmente distintos não é possível dizer que há diferença estatística entre os valores medidos.

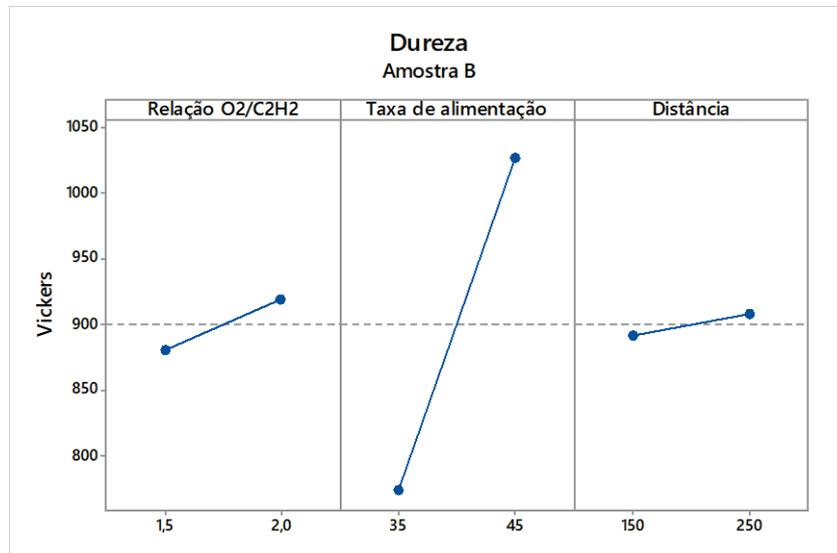
Figura 39 - Efeitos principais sobre as médias de tensão de ruptura dos revestimentos de chama-pó.



Fonte: O autor (2020).

A Figura 40 apresenta graficamente a influência de cada parâmetro, ou seja, o efeito de cada nível para cada fator sobre a microdureza Vickers dos revestimentos. O único fator de influência para a dureza do revestimento foi a taxa de alimentação do pó, novamente isso se deve a quantidade de oxigênio disponível para as partículas. Que promove oxidação e mudanças de fase devido a energia disponível.

Figura 40 - Efeitos principais sobre as médias de microdureza Vickers dos revestimentos de chama-pó.



Fonte: O autor (2020).

Para saber se há diferença significativa entre os resultados de cada nível, é necessário um teste comparação de médias par-a-par. O teste estatístico utilizado nesses resultados foi o de Tukey, o qual permite identificar diferenças significativas nos resultados de cada nível, para cada parâmetro. A Tabela 13 mostra o resumo dos níveis que apresentam o melhor resultado, sendo os valores igualmente significativos apresentados juntos na mesma célula da tabela.

Tabela 13 – Níveis que apresentaram melhores resultados, associados por igualdade significativa pelo teste de Tukey, para os revestimentos por Chama-pó.

Liga	WOKA 3652 (WC10Co4Cr)		
	Relação de combustão	Taxa de alimentação	Distância
Porosidade	1,5	45	150 250
Oxidação	1,5	35 45	150
Aderência	1,5 2	35 45	150 250
Dureza	1,5 2	45	150 250
Parâmetro Taguchi	1,5	45	150

Fonte: O autor (2020).

O resumo apresentado na Tabela 13 permite e facilita a tomada de decisão sobre qual nível de cada parâmetro testado será utilizada para deposição do

revestimento de confirmação de otimização. Os valores dos níveis otimizados estão nesta tabela como “Parâmetro Taguchi”, que é um balanço geral sobre qual nível é mais indicado para melhorar cada parâmetro.

#### 4.2.1 Revestimentos com parâmetros otimizados para Chama-pó (FS)

A combinação de parâmetros para ideal para o revestimento estudado coincide com os valores do experimento B4, logo não foi necessário realizar experimento de confirmação. Os gráficos do tipo boxplot anteriores comprovam os resultados.

### 4.3 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE DESGASTE

Após a realização dos ensaios de desgaste por slurry (Tabela 14), foi levantada a curva da perda de massa pelo tempo acumulado (Figura 41).

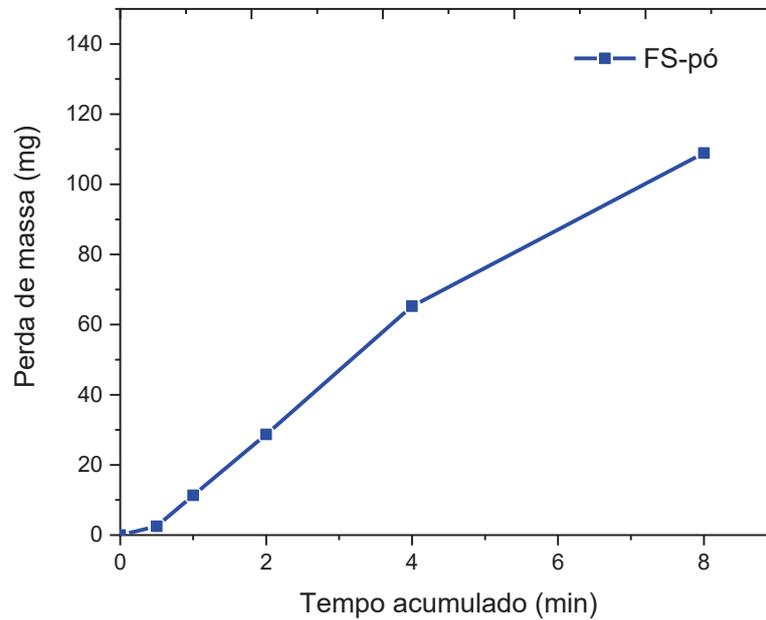
O comportamento apresenta uma sutil tendência de desaceleração na perda de massa, conforme pode ser visto na figura 42, porém não é esperado que a taxa de erosão reduza significativamente com o tempo, pois a estrutura do revestimento é homogênea, entretanto ainda foi ligeiramente superior ao material de base da turbina, o que ainda possibilita sua utilização para recuperação de espessura.

Tabela 14 - Resultados de desgaste por slurry (corpo de prova polido).

<b>Varição de massa (mg) em min:</b>	
0,5	2,5200
1	11,3400
2	28,7000
4	65,2200
6	86,3000
8	108,9200

Fonte: O autor (2020).

Figura 41 - Perda de massa por slurry



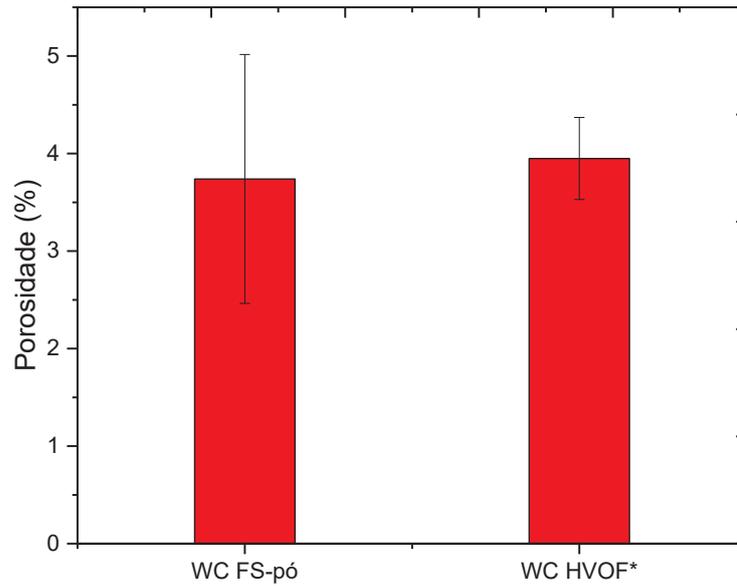
Fonte: O autor (2020).

#### 4.4 COMPARAÇÃO COM HVOF

Os resultados obtidos com a liga depositada pelo processo chama-pó foram comparados com os resultados da mesma liga depositada com HVOF por e a liga CA6NM (quando pertinente), que é o material de base mais comum para o tipo de turbina utilizada.

Em termos de porosidade é possível afirmar que os níveis medidos nos revestimentos foram bastante similares (Figura 42), o que vai no contrassenso da literatura, onde se espera que uma porosidade obtida pelo processo a chama seja bem superior ao processo HVOF.

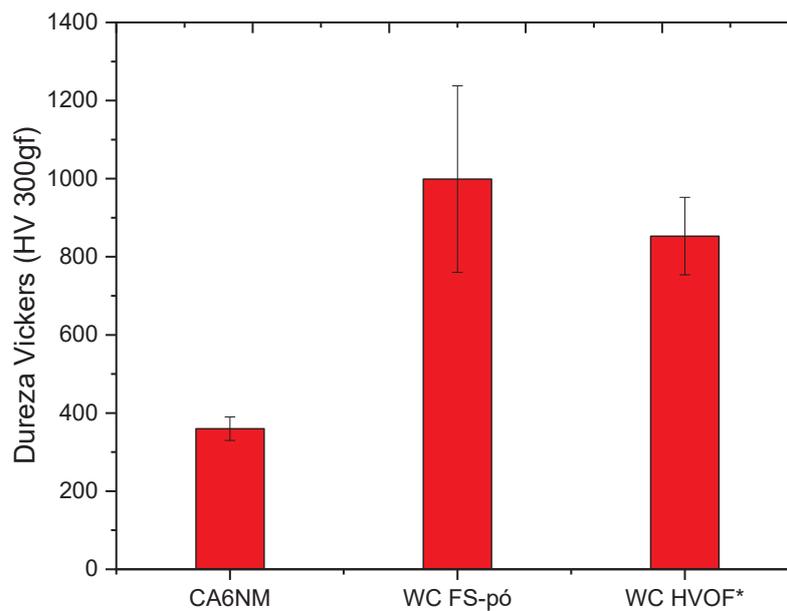
Figura 42 - Comparação da porosidade dos processos



Fonte: O autor (2020).

A dureza dos diferentes processos também foi similar (Figura 43), o que é esperado considerando que a liga depositada foi a mesma. Foi colocada a dureza do metal de base para comparação.

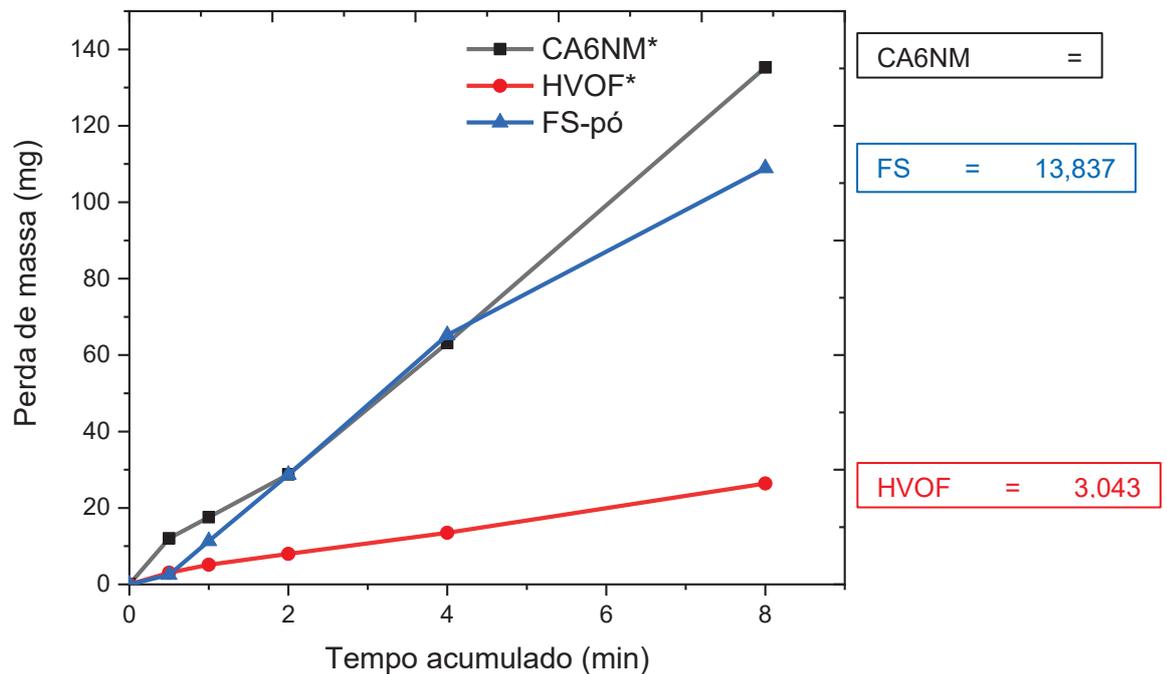
Figura 43 - Comparação de dureza.



Fonte: O autor (2020).

Na Figura 44 é possível ver que a perda de massa do revestimento produzido pelo processo FS-pó foi muito superior ao produzido por HVOF, porém ainda é inferior ao metal de base. Como os outros valores foram similares, estima-se que essa diferença da perda de massa se deva à diferença de aderência entre os processos, assim as partículas do processo FS-pó acabam arrancadas ao invés de serem desgastadas, como ocorre no processo HVOF

Figura 44 - Comparação da perda de massa por slurry. \* Valores retirados de Bertuol (2020).



Fonte: O autor (2020).

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após a otimização da aplicação, provou-se que é possível obter o revestimento de carboneto de tungstênio WOKA 3652 pelo processo FS-pó, sendo que a análise de Taguchi provou que o fator mais influente para o revestimento é a taxa de alimentação, seguida pela relação de combustão e por último a distância.

Os resultados de porosidade e oxidação se mostraram superiores aos encontrados na literatura para o processo FS, chegando próximos ao HVOF.

É possível obter revestimentos de WC depositados por FS-pó que apresentam resultados de dureza superiores aos observados em revestimentos depositados por HVOF, conforme comparação aos obtidos na literatura especializada utilizada como referência; bem como menores valores de porosidade. Isto se deve ao melhoramento obtido pela otimização dos parâmetros, que permitiu aumentar a compactação da camada depositada sem perda significativa dos carbonetos da liga.

Também é possível obter um revestimento que resiste ao ensaio de desgaste por Slurry, sem apresentar degradação generalizada ou deslocamento, no entanto, quando comparado ao desempenho dos revestimentos depositados por HVOF, nota-se uma taxa de erosão significativamente maior, porém inferior ao observado no substrato de CA6NM.

Conclui-se que com um maior aprofundamento nos parâmetros de aplicação pode ser possível obter um revestimento de FS como substituto viável em aplicações específicas, onde a erosão por desgaste abrasivo não seja severa.

### 5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Recomenda-se a variação de parâmetros visando especificamente a obtenção de melhores resultados de aderência, sendo inclusive de interesse significativo estudar uma outra liga com maior percentual em massa da matriz, o que deve proporcionar melhor ancoramento aos carbonetos, resultando em aumento da aderência.

## REFERÊNCIAS

ASM, American Society for Metals. **Handbook of Thermal Spray Technology, Materials**, ASM Handbook, 2004.

ASM, American Society for Metals. **Thermal Spray Coatings, Surface Engineering**, ASM Handbook, 1994.

BERTUOL, K. **ESTUDO DO EFEITO SINÉRGICO CAVITAÇÃO/EROSÃO EM REVESTIMENTOS DE CARBONETO DE CROMO E TUNGSTÊNIO DEPOSITADOS POR ASPERSÃO TÉRMICA DE ALTA VELOCIDADE**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ, Ponta Grossa, 2020.

BOCCANERA, L. F. **Resistência a erosão por cavitação de revestimentos depositados por soldagem e aspersão térmica**. 1999.

BUNSHAH, R. F. **Handbook of deposition technologies for films and coatings: science, technology, and applications**. William Andrew, 1994.

COSTA, P. P. B.; NIKKEL, W.; SUCHARSKI, G. B.; PAREDES, R. S. C. **Avaliação da resistência à abrasão por impacto de revestimento duro depositado pelo processo de aspersão térmica por arco elétrico**. In: IX Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação – COBEF, Joinville, SC, 2017.

COSTA, P. P. B.; SUCHARSKI, G. B.; UHLMANN, W. C.; PADILHA, H.; PAREDES, R. S. C. **Otimização de parâmetros do processo de aspersão térmica chama pó para revestimento FeCrMnSiB**. In: Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação – COBEF, Joinville, SC, 2017.

CUI, S. Y., MIAO, Q., LIANG, W. P., HUANG, B. Z., DING, Z., & CHEN, B. W. Slurry erosion behavior of F6NM stainless steel and high-velocity oxygen fuel-sprayed WC-10Co-4Cr coating. **Journal of Thermal Spray Technology**, 26, 473-482. 2017.

DING, X., CHENG, X. D., LI, C., YU, X., DING, Z. X., & YUAN, C. Q. Microstructure and performance of multi-dimensional WC-CoCr coating sprayed by HVOF. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 96, 1625-1633. 2018.

DING, Y. **Effects of elevated temperature exposure on the microstructural evolution of Ni (Cr)-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> coated 304 stainless steel**. 2009. Tese de Doutorado. University of Nottingham.

ESCALER, X., FARHAT, M., AVELLAN, F., & EGUSQUIZA, E. Cavitation erosion tests on a 2D hydrofoil using surface-mounted obstacles. **Wear**, 254(5-6), 441-449. 2003.

GHABCHI, W. **Resistant Carbide-based Thermal Sprayed Coatings: Process, Properties, Mechanical Degradation and Wear**. The Graduate School, 2011. Stony Brook University, NY.

- HAN, Y. G., YANG, Y., WANG, L., CHEN, X. G., CHU, Z. H., ZHANG, X. N., ... & LI, C. G. Microstructure and properties of in-situ TiB<sub>2</sub> matrix composite coatings prepared by plasma spraying. **Applied Surface Science**, 431, 48-54. 2018
- HAWTHORNE, H. M., ARSENAULT, B., IMMARIGEON, J. P., LEGOUX, J. G., & PARAMESWARAN, V. R. Comparison of slurry and dry erosion behaviour of some HVOF thermal sprayed coatings. **Wear**, 225, 825-834. 1999.
- HIDALGO, V. H., VARELA, J. B., MENENDEZ, A. C., MARTINEZ, S. P. Experimental study. Effects of thermal spray procedure and thermal fatigue on microstructure and properties of NiCrAlMoFe coating. **Surface engineering**, 17(6), 2001, 512-517.
- IRVING, B.; KNIGHT, R.; SMITH, R. W. The HVOF process-The hottest topic in the thermal spray industry. **Welding journal**, v. 72, n. 7, p. 25-30, 1993.
- KOVALEVA, M. et al. Structure and microhardness of titanium-based coatings formed by multichamber detonation sprayer. **Physics Research International**, v. 2015, 2015.
- KULU, P.; HUSSAINOVA, I.; VEINTHAL, R. Solid particle erosion of thermal sprayed coatings. **Wear**, v. 258, n. 1-4, p. 488-496, 2005.
- KUMAR, H.; CHITTOSIYA, C.; SHUKLA, V. N. HVOF Sprayed WC Based Cermet Coating for Mitigation of Cavitation, Erosion & Abrasion in Hydro Turbine Blade. **Materials Today: Proceedings**, v. 5, n. 2, p. 6413–6420, 2018.
- LAVIGNE, S., POUGOUM, F., SAVOIE, S., MARTINU, L., KLEMBERG-SAPIEHA, J. E., & SCHULZ, R. Cavitation erosion behavior of HVOF CaviTec coatings. **Wear**, 386, 90-98. 2017.
- LIMA, C. R.; TREVISAN, R. E. **Thermal Spray: Fundamentals and Applications**. São Paulo, 2007.
- LIRA, S. A. **Planejamento de Experimentos. Apostila**. Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2012.
- LIU, W. H., SHIEU, F. S., & HSIAO, W. T. Enhancement of wear and corrosion resistance of iron-based hard coatings deposited by high-velocity oxygen fuel (HVOF) thermal spraying. **Surface and Coatings Technology**, 249, 24-41. 2014.
- MARQUES, A. S., DALCIN, R. L., OLIVEIRA, L. F., SILVA, L. A. V. D., SANTOS, G. R. D., & ROCHA, A. D. S. (2018). Comparative analysis of the friction and microstructural properties of WC-10Co-4Cr and Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25NiCr coatings sprayed by high-velocity oxy-fuel (HVOF). **American Journal of Materials Science**. Rosemead, CA. Vol. 8, no. 3 (2018), p. 51-57.
- MATIKAINEN, V.; KOIVULUOTO, H.; VUORISTO, P.; SCHUBERT, J.; HOUDKOVÁ, Š. Effect of Nozzle Geometry on the Microstructure and Properties of HVOF-Sprayed WC-10Co<sub>4</sub>Cr and Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25NiCr Coatings. **Journal of Thermal Spray Technology**, v. 27, n. 4, p. 680-694, 2018.

MOSKOWITZ, L. N. Application of HVOF thermal spraying to solve corrosion problems in the petroleum industry—an industrial note. **Journal of thermal spray technology**, v. 2, n. 1, p. 21-29, 1993.

MURUGAN, K.; RAGUPATHY, A.; BALASUBRAMANIAN, V.; SRIDHAR, K. Optimizing HVOF spray process parameters to attain minimum porosity and maximum hardness in WC-10Co-4Cr coatings. **Surface and Coatings Technology**, v. 247, n. 25, p. 90-102, 2014.

OERLIKON METCO. **An Introduction to Thermal Spray**. Caderno informativo do fabricante. V.6, Suíça, 2016.

PADILHA, H. **Desenvolvimento “In Situ” de Intermetálicos Ni-Al em Superfícies de Aço Inoxidável Aisi 304 Através da Aplicação por Aspersão Térmica de Mistura de Pós de Níquel e Alumínio**. Curitiba. Tese de Doutorado. Universidade federal do Paraná, 2011.

PAREDES, R. S. C., **ASPERSÃO TÉRMICA - AT**. Texto Guia. (Curso de Especialização em Engenharia de Materiais Metálicos) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

PAWAR, M. J.; PATNAIK, Amar; NAGAR, Ravindra. Numerical simulation and experimental validation of granite powder filled jute epoxy composite for slurry jet erosive wear. **International Polymer Processing**, v. 31, n. 1, p. 37-50, 2016.

PAWLOWSKI, L. **The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings**. Alemanha, Wiley, 2008.

PICAS, J. A., PUNSET, M., BAILE, M. T., MARTÍN, E., & FORN, A. Effect of oxygen/fuel ratio on the in-flight particle parameters and properties of HVOF WC-CoCr coatings. **Surface and Coatings Technology**, 205, S364-S368. 2011.

PRASANNA, N. D., SIDDARAJU, C., SHETTY, G., RAMESH, M. R., & REDDY, M. Studies on the role of HVOF coatings to combat erosion in turbine alloys. **Materials Today: Proceedings**, 5(1), 3130-3136. 2018

PUKASIEWICZ, A. G. M. **DESENVOLVIMENTO DE REVESTIMENTOS FE-MN-CR-SI-NI RESISTENTES À CAVITAÇÃO DEPOSITADAS POR ASPERSÃO ASP** (Tese de doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

RUSCH, W. Comparison of operating characteristics for gas and liquid fuel HVOF torches. **Thermal Spray**, v. 2007, p. 572, 2007.

ROY, R. K. **Design of Experiments Using the Taguchi Approach: 16 Steps to Product and Process Improvement**. New York: John Wiley & Sons, 2001.

SABER, J. V., **A INFLUÊNCIA DO MATERIAL DE SUBSTRATO NA ADERÊNCIA DE UM REVESTIMENTO DE LIGA Fe-Cr-Mn-Si-B DEPOSITADA POR**

**PROCESSO DE HVOF.** Trabalho de conclusão de curso, bacharelado em engenharia mecânica, Universidade Federal do Paraná, UFPR, 2017.

SCHWETZKE, R.; KREYE, H. Cavitation erosion of HVOF coatings. In: **ITSC 1996.** ASM International, 1996. p. 153-158.

SIDHU, T. S.; PRAKASH, S.; AGRAWAL, R. D. Studies on the properties of high-velocity oxy-fuel thermal spray coatings for higher temperature applications. **Materials Science**, v. 41, p. 805-823, 2005.

SOUZA, R. R. M., ARAÚJO, F. O., RIBEIRO, K. J. B., DUMELOW, T., COSTA, J. A. P., & ALVES, C. Ionic nitriding in cathodic cage of AISI 420 martensitic stainless steel. **Surface Engineering**, 24(1), 52-56. 2008

SUCHARSKI, G., B. **Deposição de revestimentos tipo barreira térmica por aspersão térmica** (Dissertação de mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

SUGIYAMA, K.; NAKAHAMA, S.; HATTORI, S.; NAKANO, K. Slurry wear and cavitation erosion of thermal-sprayed cermets. **Wear**, v. 258, n. 5–6, p. 768–775, 2005.

TAGUCHI, G. **Engenharia da Qualidade em Sistemas de Produção.** São Paulo: McGraw-Hill, 1990.

THAKUR, L.; ARORA, N.; JAYAGANTHAN, R.; SOOD, R. An investigation on erosion behavior of HVOF sprayed WC-CoCr coatings. **Applied Surface Science**, v. 258, n. 3, p. 1225–1234, 2011.

VASHISHTHA, N.; KHATIRKAR, R. K.; SAPATE, S. G. Tribological behaviour of HVOF sprayed WC-12Co, WC-10Co-4Cr and Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>- 25NiCr coatings. **Tribology international**, v. 105, p. 55-68, 2017.

VICENZI, J. **Relação entre microestrutura e erosão (a frio e a quente) de revestimentos do sistema NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> obtidos por aspersão térmica.** Tese (Doutorado em Engenharia), programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM. UFRGS, 2007.

VOGGENREITER, H., HUBER, H., BEYER, S., & SPIES, H. J. Influence of particle velocity and molten phase on the chemical and mechanical properties of HVOF-sprayed structural coatings of Alloy 316L (No. CONF-9509182-). **ASM International, Materials Park, OH (United States)**, 1995.

WILSON, S.; METCO, S. Abradable thermal spray applications and technology. **ASM Handbook**, v. 5, p. 287-295, 2013.

XIANG, D. I. N. G., CHENG, X. D., XIANG, Y. U., CHAO, L. I., YUAN, C. Q., & DING, Z. X. Structure and cavitation erosion behavior of HVOF sprayed multi-dimensional WC-10Co4Cr coating. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, 28(3), 487-494. 2018

YUPING, W., PINGHUA, L., CHENGLIN, C., ZEHUA, W., MING, C., & JUNHUA, H. Cavitation erosion characteristics of a Fe–Cr–Si–B–Mn coating fabricated by high velocity oxy-fuel (HVOF) thermal spray. **Materials Letters**, 61(8-9), 2007

ZHANG, H.; DONG, X.; CHEN, S. Solid particle erosion-wear behaviour of Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>–NiCr coating on Ni-based superalloy. **Advances in Mechanical Engineering**, v. 9, n.3, p. 1-9, 2017.