DENIS MARCEL PIRES NAGASIMA

**Efeito da remoção eletrolítica para reparo do revestimento de WC-10Co-4Cr
aplicado por HVOF em aplicação de desgaste erosivo**

São Paulo
(2018)

DENIS MARCEL PIRES NAGASIMA

**Efeito da remoção eletrolítica para reparo do revestimento de WC-10Co-4Cr
aplicado por HVOF em aplicação de desgaste erosivo**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Ciências

Orientador: Prof. Dr. Roberto Martins de
Souza

São Paulo
(2018)

DENIS MARCEL PIRES NAGASIMA

**Efeito da remoção eletrolítica para reparo do revestimento de WC-10Co-4Cr
aplicado por HVOF em aplicação de desgaste erosivo**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Ciências

Área de Concentração: Engenharia
mecânica de projeto e fabricação

Orientador: Prof. Dr. Roberto Martins de
Souza

São Paulo
(2018)

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

NAGASIMA, DENIS MARCEL PIRES

Efeito da remoção eletrolítica para reparo do revestimento de WC-10Co 4Cr aplicado por HVOF em aplicação de desgaste erosivo / D. M. P. NAGASIMA -- versão corr. -- São Paulo, 2018. 143 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1.Revestimento 2.Erosão 3.HVOF 4.Carboneto de tungstênio
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

NAGASIMA, D. M. P. Título: Efeito da remoção eletrolítica para reparo do revestimento de WC-10Co-4Cr aplicado por HVOF em aplicação de desgaste erosivo. São Paulo. 2018. 143 p. (Dissertação apresentada para obtenção do título de mestre) Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

À minha querida noiva Érica, pelo apoio, carinho e dedicação.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Roberto Martins de Souza pela paciência, apoio e confiança.

Ao meu irmão Thiago Pires Nagasima pelo apoio e discussões.

Ao colega Josef Seidl, pelas diversas lições sobre revestimento em rotores tipo Pelton.

Ao Dr. Axel Kratzsch da Voith Hydro, por disponibilizar o laboratório para ensaios de erosão, bem como ao suporte e discussões presentes em algumas partes desse trabalho.

Aos colegas e amigos Marcel Silva e André Camargo, pela paciência e discussões que auxiliaram nesse trabalho.

Ao Fabiano Raymundo dos Santos do IPT que auxiliou na caracterização com o microscópio confocal.

Aos colegas Raphael Ferreira, Arnaldo Oliveira Lima, Rodnei Santos e demais colegas do LFS que auxiliaram na preparação das amostras e análises.

À Voith Hydro pelo suporte à realização desse trabalho.

“A mais necessária das ciências é esquecer o mal aprendido noutros tempos.”

Aristóteles

“Determinação, coragem e autoconfiança são fatores decisivos para o sucesso. Se estamos possuídos por uma inabalável determinação, conseguimos superá-los. Independentemente das circunstâncias, devemos ser humildes, recatados e despidos de orgulho.”

Dalai Lama

RESUMO

A operação de uma turbina hidráulica para hidrogeração alocada em um rio com sedimentos pode levar ao desgaste erosivo e, consequentemente, manutenção prematura do componente. Visando mitigar esse problema, em geral, aplicam-se revestimentos que aumentam a vida útil das turbinas, mas não eliminam o desgaste erosivo ocorrido, o que leva à necessidade de reparo do componente. O reparo se inicia com a remoção do revestimento remanescente e reconstituição da geometria por solda, para então, reaplicação de um novo revestimento. Nem sempre as regiões afetadas são grandes, o que possibilitaria a aplicação de um reparo por soldagem e também reparo de revestimento localizado na turbina. O reparo sobre o revestimento pode ser aplicado tanto na recuperação de componentes que sofrem desgaste erosivo, bem como, para consertar problemas ocorridos durante o processo de revestimento anterior. O presente trabalho visa compreender e verificar a possibilidade de reparo em um revestimento de WC-10Co-4Cr executado pelo processo de aspersão térmica HVOF (*high velocity oxy fuel*), bem como, suas limitações em desgaste erosivo. O estudo foca na preparação sobre um revestimento existente (remoção eletroquímica) e aplicação de uma nova camada. Como avaliação inicial o trabalho considerou o ensaio de desgaste erosivo, onde foi encontrado aumento de 22% na quantidade de material erodido nos corpos de prova com reparo. A observação e comparação dos corpos de prova com e sem reparo, utilizando microscopia eletrônica de varredura (MEV), mostra que a diferença em desgaste está na delaminação entre camadas devido à falha coesiva, a qual pôde ser observada através do ensaio de adesão. A falha coesiva pode ser explicada com base em análise por EDS dos corpos de prova, por intermédio da qual foi verificado um aumento na quantidade de oxigênio e, consequentemente, presença de óxido na preparação superficial por remoção eletroquímica.

Palavras-Chave: Revestimento. Erosão. HVOF. Carboneto de tungstênio.

ABSTRACT

The operation of a hydraulic turbine for hydropower generation located in a river with sediments can lead to erosive wear, and, as a consequence, premature maintenance of the component. In order to minimize such problem, coatings are applied to increase turbine lifetime, but they do not eliminate erosive wear, which leads to the necessity of component repair. The repair starts with the removal of the remaining coating and reconstitution of the geometry by welding, and then reapplication of a new coating. The affected regions are not necessarily large, which would allow the application of a localized repair by welding and localized repair by coating. The coating repair can be applied in two situations: recovery of components with erosive wear and to fix problems during coating manufacturing. The present work aims to understand and verify the possibility of repair in a WC-10Co-4Cr coating performed by the thermal spraying HVOF process (high velocity oxy fuel), as well as, its limitations in erosive wear. This study focuses in the preparation of an existing coating (electrochemical removal) and application of new coating layers. The start point was an evaluation using an erosion test rig, which indicated an increase of 22% in material removal for the test samples with repair. Using scanning electron microscope (SEM), the test samples with and without repair were compared and showed a wear difference related to delamination between layers due to cohesive failure, which was also observed in the adhesion test. The cohesive failure can be explained by EDS, where it was found a high content of oxygen in the repaired zones, and, as a consequence, presence of oxide in the surface preparation by electrochemical removal.

Keywords: Coating. Erosion. HVOF. Tungsten carbide.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – TIPOS DE TURBINA E FAIXA DE APLICAÇÃO	9
FIGURA 2 – PRINCIPAIS COMPONENTES DE UMA TURBINA TIPO PELTON	11
FIGURA 3 – INJETOR E ROTOR PELTON	12
FIGURA 4 – ENSAIO DE TURBINA PELTON	12
FIGURA 5 – CORTE DE UMA MÁQUINA TIPO FRANCIS	14
FIGURA 6 – CORTE DA TURBINA FRANCIS	14
FIGURA 7 – CORTE DE UMA MÁQUINA KAPLAN	16
FIGURA 8 – CORTE DE UMA TURBINA KAPLAN SOBRE UM MODELO 3D	16
FIGURA 9 – MODOS DE DANO POR IMPACTO EM UM MATERIAL DÚCTIL	18
FIGURA 10 – FORÇAS ENVOLVIDAS DURANTE O PROCESSO DE EROÇÃO	21
FIGURA 11 – MOVIMENTAÇÃO DE SEDIMENTOS EM TURBINAS PELTON	23
FIGURA 12 – MODOS DE REMOÇÃO EM UM ROTOR PELTON (SEDIMENTOS DE TAMANHO MÉDIO DE: 1 – 302 μm ; 2 – 135 μm ; 3 – 45 μm): A – ENTRADA (SPLITTER), B – FUNDO DA CONCHA E C – ARESTA DE SAÍDA	25
FIGURA 13 – DESGASTE EM TURBINA PELTON SEM REVESTIMENTO APÓS 38000T DE SEDIMENTO	26
FIGURA 14 – DESGASTE EM TURBINA PELTON COM REVESTIMENTO APÓS 120000T DE SEDIMENTO	26
FIGURA 15 – DESGASTE EM UMA AGULHA DE INJETOR	27
FIGURA 16 – DESGASTE EROSIVO EM PALHETAS DIRETRIZES - HIMALAYA	28
FIGURA 17 – DESGASTE EROSIVO EM TURBINA FRANCIS - HIMALAYA	29
FIGURA 18 – DESGASTE EROSIVO NAS ARESTAS DE ENTRADA DAS PÁS	29
FIGURA 19 – REGIÃO DE MAIOR DESGASTE	31
FIGURA 20 – REGIÃO DE MAIOR DESGASTE EM KAPLAN	31
FIGURA 21 – EROÇÃO EM TURBINA KAPLAN H = 18-21.5M	32
FIGURA 22 – PROCESSOS DE ASPERSÃO TÉRMICA	33
FIGURA 23 – VELOCIDADE DA PARTÍCULA POR PROCESSO	34
FIGURA 24 – ESQUEMA BÁSICO DA PISTOLA DO PROCESSO POR HVOF	35
FIGURA 25 – REVESTIMENTO POR ASPERSÃO TÉRMICA	35
FIGURA 26 - TENSÕES RESIDUAIS DO PROCESSO	37
FIGURA 27 – ESTRUTURA DE UM REVESTIMENTO ASPERGIDO	38
FIGURA 28 – EXEMPLO DE ESTRUTURA DO 80Ni20Cr	38
FIGURA 29 – ASPERSÃO DE UMA PARTÍCULA – (A) APS; (B) VPS	40
FIGURA 30 – ANCORAGEM MECÂNICA DAS LAMELAS SOBRE O SUBSTRATO	41
FIGURA 31 – ESPALHAMENTO DA PARTÍCULA DE REVESTIMENTO: (A) ESTRELA; (B) CIRCULAR	42
FIGURA 32 – INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DO SUBSTRATO (A – 150°C, B – 250°C)	43
FIGURA 33 – MICROGRAFIA DO PÓ DE WC-10Co4Cr TÍPICA	44
FIGURA 34 – ENSAIO DE ADESÃO E POSSÍVEIS RESULTADOS	45
FIGURA 35 – MEV DA SUPERFÍCIE ERODIDA (2250 RPM, 30000 PPM E TAMANHO MÉDIO DA PARTÍCULA EROSIVA DE 300 μm)	47
FIGURA 36 – DESGASTE EROSIVO NO REVESTIMENTO DE WC-Co-Ni	48
FIGURA 37 – TAXA DE DESGASTE E ÂNGULO DE IMPACTO	49
FIGURA 38 – EROÇÃO DO WC-10CoCr COM SiO ₂ (212-425 μm) APÓS 75 MIN	49
FIGURA 39 – EROÇÃO DO WC-10Co4Cr COM SiO ₂ (106-150 μm) E VELOCIDADE DE 80 M/S	51
FIGURA 40 – MEDIÇÃO DE DUREZA PARA WC-10Co4Cr	53
FIGURA 41 – MEDIÇÃO DE TENACIDADE DO WC-10Co4Cr	54

FIGURA 42 - MEDIÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DO WC-10Co4Cr	54
FIGURA 43 – ILUSTRAÇÃO DO TESTE DE ALMEN	55
FIGURA 44 – GRÁFICO DE PARETO PARA OS FATORES QUE INFLUENCIAM A TENSÃO RESIDUAL	56
FIGURA 45 – EFEITOS MÉDIOS DOS PARÂMETROS SOBRE A INTENSIDADE ALMEN	56
FIGURA 46 – INFLUÊNCIA SOBRE A TENSÃO RESIDUAL: (A) TEMPERATURA DO SUBSTRATO; (B) DISTÂNCIA DE APLICAÇÃO.....	57
FIGURA 47 – DUREZA VERSUS POROSIDADE.....	58
FIGURA 48 – SECÇÃO POR MEV DO WC-10Co-4Cr TRATADO ANODICAMENTE	60
FIGURA 49 – TRINCA CAUSADA POR EXCESSO DE TEMPERATURA	61
FIGURA 50 – MATERIAL REMOVIDO DA TRINCA DA FIGURA 49.....	62
FIGURA 51 – COLORAÇÃO X TEMPERATURAS DO AÇO INOXIDÁVEL MARTENSÍTICO	62
FIGURA 52 – REMOÇÃO DE TRINCA CAUSADA POR FALTA DE OXIGÊNIO NO PROCESSO	63
FIGURA 53 – SECÇÃO DE UM REVESTIMENTO DE Al_2O_3 COM TRINCAS LATERAIS (PARTE SUPERIOR É O REVESTIMENTO E PARTE INFERIOR O SUBSTRATO).....	63
FIGURA 54 – SECÇÃO DE UM REVESTIMENTO DE Cr_2O_3 COM PROBLEMAS DE ADESÃO (PARTE SUPERIOR É O REVESTIMENTO E PARTE INFERIOR O SUBSTRATO).....	64
FIGURA 55 – APARECIMENTO DE TRINCAS VISUAIS NO REVESTIMENTO	65
FIGURA 56 – REMOÇÃO DA TRINCA ATÉ O SUBSTRATO.....	65
FIGURA 57 – APLICAÇÃO DO REVESTIMENTO SOBRE A ÁREA REMOVIDA.....	66
FIGURA 58 – POLIMENTO DA REGIÃO REPARADA.....	66
FIGURA 59 – IMAGEM USANDO MEV DO WC-10Co-4Cr UTILIZADO	69
FIGURA 60 – IMAGEM UTILIZANDO MEV DO WC-10Co-4Cr: A - MEDIÇÃO DAS PARTÍCULAS DE WC. B - PONTOS ONDE FORAM REALIZADAS ANÁLISES POR EDS.....	70
FIGURA 61 – CORPOS DE PROVA DE EROÇÃO (ESQUERDA) E ADESÃO (DIREITA)	72
FIGURA 62 – DIMENSÕES DO CORPO DE PROVA DE EROÇÃO	72
FIGURA 63 – DIMENSÕES DO CORPO DE PROVA DE ADESÃO.....	73
FIGURA 64 – MEDIDOR DE VAZÃO.....	74
FIGURA 65 – ALIMENTADOR DE PÓ	74
FIGURA 66 – PISTOLA DJ 2600	74
FIGURA 67 – ROBÔ PARA APLICAÇÃO DO REVESTIMENTO.....	75
FIGURA 68 – JATO PORTÁTIL	75
FIGURA 69 – GRANALHA DE ÓXIDO DE ALUMÍNIO (#24)	76
FIGURA 70 – JATEAMENTO DOS CORPOS DE PROVA	76
FIGURA 71 – RESFRIAMENTO DOS CORPOS DE PROVA.....	77
FIGURA 72 – MEDIDOR DE CAMADA FISCHER DUALSCOPE MP0R.....	78
FIGURA 73 – MEDIDOR DE RUGOSIDADE MITUTOYO SJ 210.....	78
FIGURA 74 – PONTA MONTADA PARA REMOÇÃO DO REVESTIMENTO	80
FIGURA 75 – SOLUÇÃO ELETROLÍTICA.....	80
FIGURA 76 – PARÂMETROS DA MÁQUINA DE ELETROPOLIMENTO/ATAQUE	81
FIGURA 77 – REMOÇÃO NO CP DE EROÇÃO	82
FIGURA 78 – REMOÇÃO NO CP DE ADESÃO.....	82
FIGURA 79 – CORPOS DE PROVA DE EROÇÃO PÓS REMOÇÃO ELETROLÍTICA	83
FIGURA 80 – TRINCAS E DESPLACAMENTO NO QUINTO PASSE	85
FIGURA 81 – TRINCAS E DESPLACAMENTO NO TERCEIRO PASSE.....	85
FIGURA 82 – ABRASIVO RETIRADO A JUSANTE DE UM MÁQUINA PELTON	86
FIGURA 83 – ESQUEMA DO EQUIPAMENTO DE TESTES DE EROÇÃO.....	89
FIGURA 84 – FOTO DO POSICIONAMENTO DO CORPO DE PROVA.....	89
FIGURA 85 – ESTUFA PARA SECAGEM DOS CORPOS DE PROVA.....	90
FIGURA 86 – BALANÇA DE PRECISÃO	91

FIGURA 87 – PRÉ-AQUECIMENTO PARA ELIMINAR UMIDADE DOS CORPOS DE PROVA	91
FIGURA 88 – DISPOSITIVO PARA ALINHAMENTO E CURA DOS CORPOS DE PROVA	92
FIGURA 89 – MÁQUINA DE ENSAIO DE TRAÇÃO UTILIZADA NO ENSAIO	92
FIGURA 90 – MEV JEOL JSM-6010LA	93
FIGURA 91 – MICRO DURÔMETRO BUEHLER	94
FIGURA 92 – MEDIÇÃO DE NANO DUREZA	95
FIGURA 93 – COMPARAÇÃO DA RUGOSIDADE POR TRATAMENTO SUPERFICIAL: (A) ELETROPOLIMENTO; (B) JATEAMENTO	100
FIGURA 94 – ENSAIO DE ADESÃO CP 09 (GRUPO B)	103
FIGURA 95 – ENSAIO DE ADESÃO CP 10 (GRUPO B)	103
FIGURA 96 – ENSAIO DE ADESÃO CP 11 (GRUPO B)	103
FIGURA 97 – ENSAIO DE ADESÃO CP 04 (GRUPO A)	103
FIGURA 98 – ENSAIO DE ADESÃO CP 07 (GRUPO A)	104
FIGURA 99 – ENSAIO DE ADESÃO CP 12 (GRUPO A)	104
FIGURA 100 – MEDIÇÃO DE DUREZA CP06	105
FIGURA 101 – MEDIÇÃO DE DUREZA NA PRIMEIRA CAMADA CP06	105
FIGURA 102 – MEDIÇÃO DE DUREZA CP09	106
FIGURA 103 – VALORES DE DUREZA ENCONTRADOS	106
FIGURA 104 – MEDIÇÃO DE NANO-DUREZA SOBRE AS PARTÍCULAS DE PÓ	107
FIGURA 105 – COMPARAÇÃO DE NANO-DUREZA NOS CORPOS DE PROVA	108
FIGURA 106 – IMAGEM POR MICROSCÓPIO ÓTICO DO CP08 (APÓS 300G DE ABRASIVO) ..	110
FIGURA 107 – IMAGEM POR MICROSCÓPIO ÓTICO DO CP 09 (APÓS 300G DE ABRASIVO) ..	110
FIGURA 108 – IMAGEM POR MICROSCÓPIO ÓTICO DO CP10 (APÓS 300G DE ABRASIVO) ..	110
FIGURA 109 – IMAGEM POR MICROSCÓPIO ÓTICO DO CP03 (APÓS 300G DE ABRASIVO) ..	111
FIGURA 110 – IMAGEM POR MICROSCÓPIO ÓTICO DO CP05 (APÓS 300G DE ABRASIVO) ..	111
FIGURA 111 – IMAGEM POR MICROSCÓPIO ÓTICO DO CP06 (APÓS 300G DE ABRASIVO) ..	112
FIGURA 112 – IMAGEM POR MICROSCÓPIO ÓTICO DO CP07 (APÓS 300G DE ABRASIVO) ..	112
FIGURA 113 – SUPERFÍCIE DIGITALIZADA DO CP3 EM 3D (A) E SUPERFÍCIE RECONSTITUÍDA (B)	112
FIGURA 114 – ESTIMATIVA DA MASSA DE MATERIAL BASE ERODIDA BASEADA EM MICROSCOPIA COM FOCAL	114
FIGURA 115 – VISTA DE TOPO DO CP10	118
FIGURA 116 – SECCIONAMENTO DO CP09	119
FIGURA 117 – MEV DO TOPO DO CP03	120
FIGURA 118 – INTERFACE INDICANDO DELAMINAÇÃO DE CAMADAS NO CP03	121
FIGURA 119 – REGIÃO DE INTERFACE NA SAÍDA DO JATO NO CP03	122
FIGURA 120 – INTERFACE ENTRE REVESTIMENTO E MATERIAL BASE CP03	122
FIGURA 121 – TOPO PRÓXIMO À ENTRADA DO JATO NO CP05	123
FIGURA 122 – INTERFACE PRÓXIMA A SAÍDA DO JATO NO CP05	123
FIGURA 123 – VISUALIZAÇÃO DE TOPO DO CP07	124
FIGURA 124 – REGIÕES COM DELAMINAÇÃO NO CP07	125
FIGURA 125 – SECCIONAMENTO DO CP06	125
FIGURA 126 – APROXIMAÇÃO NA ABERTURA ENCONTRADA COM MAPA DE OXIGÊNIO NO CP06	126
FIGURA 127 – PONTOS PARA ANÁLISE POR EDS NO LADO ESQUERDO DO CP06	127
FIGURA 128 – SECCIONAMENTO LADO ESQUERDO E MAPEAMENTO DE OXIGÊNIO NO CP06	128
FIGURA 129 – REGIÃO DE INTERFACE NO SECCIONAMENTO DO CP07	128
FIGURA 130 – AUMENTO DA REGIÃO EM AZUL DA FIGURA 116 DO CP06	129
FIGURA 131 – MAPEAMENTO EDS NA FACE DO CP DE ADESÃO 09	130

FIGURA 132 – MAPEAMENTO EDS NO CONTRA CORPO DO CP DE ADESÃO 09.....	131
FIGURA 133 – SECCIONAMENTO DO CP07 E TAMANHO DE PARTÍCULAS DE WC.....	132

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

ASM	American Society for Metals
ASME	American Society of Mechanical Engineers
ASTM	American Society for Testing and Materials
AWS	American Welding Society
ETH Zürich	Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
HVAF	High Velocity Air Fuel
HVOF	High Velocity Oxy Fuel
IEC	International Electrotechnical Commission

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	7
2	OBJETIVOS	8
3	REVISÃO DA LITERATURA	9
3.1	Turbinas para hidro geração	9
3.1.1	Turbinas tipo Pelton	11
3.1.2	Turbinas tipo Francis	13
3.1.3	Turbinas tipo Kaplan	15
3.2	Desgaste erosivo	17
3.2.1	Modelos de erosão	17
3.2.2	Desgaste erosivo em turbinas para hidro geração	22
3.3	Processos de aspersão térmica.....	33
3.3.1	Processos por HVOF	34
3.3.2	Parâmetros de processo	40
3.4	Materiais cerâmicos e metálicos (cermets).....	44
3.4.1	Modo de remoção do WC-Co.....	46
3.4.2	Efeitos do processo de esmerilhamento sobre o WC-10Co-4Cr	50
3.4.3	Propriedades mecânicas e processo	52
3.4.4	Tensões residuais e parâmetros de processo	54
3.4.5	Dureza, porosidade e parâmetros de processo.....	58
3.4.6	Remoção do WC-Co-Cr	59
3.4.7	Modos de falha durante o processo e operação	61
3.4.8	Processo de reparo em revestimentos	64
4	MATERIAL E MÉTODOS	68
4.1	MATERIAL	68
4.1.1	Material do substrato	68
4.1.2	Material do revestimento	68
4.2	MÉTODOS.....	71
4.2.1	Preparação dos corpos de prova	71
4.2.2	Ensaio de desgaste erosivo	86
4.2.3	Ensaio de adesão	91
4.2.4	Caracterização dos corpos de prova	93
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	96
5.1	Aplicação do processo	96
5.1.1	Tratamento superficial por remoção eletrolítica.....	98
5.1.2	Tratamento superficial por jateamento	99
5.2	Ensaio de adesão.....	101

5.3 Medição de dureza sobre o revestimento	104
5.4 Ensaio de erosão	109
5.5 Análise por microscopia eletrônica de varredura	118
5.5.1 Corpos de prova do grupo A	118
5.5.2 Corpos de prova do grupo B	119
5.5.3 Pó e revestimento	132
6 CONCLUSÕES.....	133
TRABALHOS PUBLICADOS E SUGESTÃO PARA TRABALHO FUTURO.....	135
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	136
ANEXO A: MEMORIAL DA ESTIMATIVA DA TAXA DE DESGASTE.....	142

1 INTRODUÇÃO

A geração de energia elétrica tem, entre suas fontes principais, a chamada hidro geração. Nesta, o armazenamento de água em barragens e o direcionamento a turbinas hidráulicas permite transformação da energia potencial em energia cinética.

Os rios influenciam diretamente na definição e projeto de uma usina hidroelétrica. Em particular, o projeto é uma etapa complexa, na qual podem ser avaliados os seguintes itens: custo do investimento, custo de operação, confiabilidade em longo prazo, disponibilidade e exigências de manutenção programada. A quantificação desses itens se traduz no projeto e escolha dos materiais aplicados a cada componente, além da definição do melhor tipo de turbina a ser aplicada, como, por exemplo: Francis, Kaplan, Pelton ou suas variantes.

Algumas combinações de condição operacional podem levar a um desgaste erosivo da turbina, e seus componentes (bico injetor, palhetas diretoras, tampa da turbina, rotor, entre outros), considerado excessivo do ponto de vista de disponibilidade e frequência de manutenção. Em geral, mas não unicamente, estas condições são observadas em regiões de montanhas geologicamente novas, tais como: Andes, Himalaya, Alpes e regiões da costa do pacífico. (Winkler, 2014)

O mercado possui uma série de revestimentos e processos de fabricação para situações onde o desgaste erosivo é intenso, sendo um dos revestimentos mais utilizados o de WC/Co/Cr, aplicado pelo processo de (HVOF), o qual será foco desse estudo.

Este revestimento é um material compósito que aumenta a vida útil das turbinas. No entanto, devido à geometria da turbina e aos mecanismos de remoção de material, algumas regiões são desgastadas antes que outras, levando à perda de material e de eficiência da turbina hidráulica até um limite admissível definido pelo fabricante.

As regiões desgastadas devem ser reparadas e, tradicionalmente, o revestimento deve ser refeito inteiramente para se garantir uma boa qualidade e garantia, conforme recomendação dos fabricantes de materiais e equipamentos para HVOF.

2 OBJETIVOS

Considerando o exposto na introdução, esse trabalho se propõe a estudar o reparo em revestimentos e a responder a três perguntas básicas:

- É possível fazer um reparo que mantenha ou melhore as características mecânicas do revestimento (principalmente resistência à erosão)?
- Qual é o melhor reparo possível (analisado à luz da dureza e desgaste erosivo)?
- Caso não seja possível realizar um reparo local em todas as regiões, em quais regiões seria possível aplicar? (analisado do ponto de vista de um rotor do tipo Pelton)

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Turbinas para hidro geração

As turbinas hidráulicas para hidro geração podem ser classificadas em máquinas de ação (exemplo: turbinas do tipo Pelton) ou reação (exemplo: turbinas do tipo Francis, Kaplan, Bulbo). A faixa de aplicação para cada tipo de turbina é ilustrada pela figura 1, onde a pré-seleção do tipo de turbina depende da queda líquida e da rotação específica. (Silva, 2016)

Fonte: (Silva, 2016)

A rotação específica é dada pela equação 1.

$$n_q = \frac{n \cdot \sqrt{Q}}{H^{0.75}} \quad \text{Eq. 1}$$

Onde H é a queda líquida (metros de coluna de água), n é a rotação da máquina (rpm) e Q é a vazão (m³/s).

A escolha do tipo e o dimensionamento da máquina dependerão basicamente da queda e vazão de operação. Entretanto, como ilustrado na figura 1, em vermelho, há

regiões com possibilidade de instalação de mais um tipo de turbina. Nesses casos, a escolha do tipo de máquina levará em consideração fatores como faixa de operação, geração de energia, custos dos equipamentos e construção civil, cronograma, operação e manutenção.

Os requerimentos de garantia e fornecimento de turbinas hidráulicas para hidrelétricas são guiados pelas normas da comissão internacional de eletrotécnica (IEC). Dentro dos requerimentos entram as medições em campo relativas à eficiência e também ao volume de dano permissível decorrente de cavitação.

Os danos ocorridos por cavitação são definidos na (IEC60609, 2004) e geralmente são garantidos nos contratos. A garantia relativa à cavitação não têm sido um problema devido aos avanços em simulação numérica, em bancos de dados de ensaios de modelos executados pelas empresas e medição tridimensional, ou seja, devido ao desenvolvimento tecnológico e aumento da experiência das empresas durante a etapa de cálculo, ensaios e fabricação.

A norma (IEC60609, 2004) também cita algumas considerações sobre sedimentos na água, que devido à combinação de fatores como concentração, tipo de sedimento e turbina hidráulica, podem levar a maiores danos por uma interação erosão-cavitação. Na prática, ocorrem duas situações: (I) os fornecedores não cobrem pela garantia de sinistros devido ao desgaste erosivo nos rotores pela dificuldade na previsão do desgaste e (II) normalmente não há dados suficientes sobre os sedimentos presentes na água para previsão do desgaste erosivo durante a fase de projeto.

Neste ponto entra a importância dos revestimentos que aumentam a vida útil dos equipamentos, funcionando tanto durante a fase de projeto, quanto para reduzir problemas encontrados devido à erosão após o início de operação da máquina.

3.1.1 Turbinas tipo Pelton

De acordo com a (ABNT NBR 6445, 2016), a turbina do tipo Pelton é “uma turbina de ação (transforma a energia cinética do fluxo de água em energia mecânica) na qual o fluxo d’água incide sob a forma de jato sobre o rotor possuindo pás em forma de duas conchas. A direção dos jatos é inclinada em relação ao plano do rotor”.

As figuras 2 e 3 mostram os principais componentes de uma máquina Pelton, que são:

- Pá ou concha (2): possui uma geometria que direciona o jato da água, convertendo a energia cinética do jato de água em energia cinética para o rotor;
- Rotor (3): composto de diversas conchas (2) interligadas a um disco (4), o qual é conectado ao eixo da unidade geradora (5). A figura 4 mostra a incidência do jato sobre as conchas;
- Injetor (6): controla o fluxo de água que vai para a turbina através de uma agulha. A figura 3 mostra o injetor e um modelo de rotor Pelton;
- Defletor (7): No caso de uma variação brusca de carga ou uma parada emergencial, o defletor de jato é acionado para desviar o fluxo de água no rotor, evitando assim o fechamento rápido do injetor;
- Freio de jato (8): auxilia a frenagem do rotor através de um jato d’água.

Figura 2 – Principais componentes de uma turbina tipo Pelton

Fonte: (ABNT NBR 6445, 2016)

Figura 3 – Injetor e rotor Pelton

Adaptado de: (Voith Hydro, 2013)

Figura 4 – Ensaio de turbina Pelton

Fonte: (Perez, 2014)

3.1.2 Turbinas tipo Francis

De acordo com a (ABNT NBR 6445, 2016), a turbina do tipo Francis é uma “turbina de reação (em que a energia mecânica é obtida a pela transformação das energias cinética e potencial d’água), na qual o fluxo d’água penetra radialmente no distribuidor e no rotor, no qual as pás são fixas”.

Turbinas do tipo Francis são amplamente utilizadas, pois possibilitam aplicação em uma faixa que varia desde quedas intermediárias a altas quedas. Como exemplo, podem-se citar algumas das usinas de grande porte no Brasil que possuem máquinas do tipo Francis: Itaipu, Tucuruí e Belo Monte.

As figuras 5 e 6 mostram os principais componentes de uma máquina com turbina do tipo Francis, que são:

- Rotor Francis (8): composto por um conjunto de pás fixas ao cubo e à coroa do rotor Francis;
- Palheta diretriz (9): controla o fluxo de vazão da turbina através do movimento do conjunto de palhetas diretrizes;
- Pré-distribuidor (10): guia o fluxo de água para as palhetas diretrizes através de travessas fixas;
- Tubo de sucção (13): elemento à jusante da turbina que faz a condução do fluxo de água após passar pelo rotor da turbina até o reservatório de jusante;
- Caixa espiral (14): guia o fluxo de água para a turbina;
- Aro de regulação (16): mecanismo conectado às palhetas diretrizes e ao servomotor.

Figura 5 – Corte de uma máquina tipo Francis

Fonte: (ABNT NBR 6445, 2016)

Figura 6 – Corte da turbina Francis

Fonte: (Voith Hydro 1, 2013)

3.1.3 Turbinas tipo Kaplan

De acordo com a (ABNT NBR 6445, 2016), a turbina do tipo Kaplan é uma “turbina de reação (em que a energia mecânica é obtida pela transformação das energias cinética e de pressão do fluxo d’água), na qual o fluxo d’água penetra axialmente no rotor”.

As turbinas do tipo Kaplan são conhecidas também como máquinas de dupla regulação, pois neste tipo de máquina, há tanto movimentação das palhetas diretrizes quanto das pás Kaplan. A possibilidade de combinação de diferentes aberturas das palhetas/pás faz com que seja possível ampliar a faixa de trabalho e melhorar a eficiência de operação da turbina.

As figuras 7 e 8 mostram os principais componentes de uma máquina com turbina do tipo Kaplan, que são:

- Rotor Kaplan (7): O rotor Kaplan é formado por um cubo que abriga os elementos que fazem a movimentação das pás Kaplan;
- Palheta diretriz (8): O controle do fluxo de vazão da turbina é feito através do movimento de um conjunto de palhetas diretrizes, as quais são movimentadas através do aro de regulação;
- Pré-distribuidor (9): O pré-distribuidor é formado por travessas fixas que guiam o fluxo de água para as palhetas diretrizes;
- Tubo de sucção (12): Elemento à jusante da turbina que faz a condução do fluxo de água após passar pelo rotor da turbina até o reservatório de jusante;
- Caixa espiral (13): Faz o guiamento do fluxo de água para a turbina, pode ter construção formada por virolas metálicas soldadas ou construída em concreto;
- Aro de regulação (15): O aro de regulação é movimentado através de servomotores.

Figura 7 – Corte de uma máquina Kaplan

Fonte: (ABNT NBR 6445, 2016)

Figura 8 – Corte de uma turbina Kaplan sobre um modelo 3D

Fonte: (Perez, 2014)

3.2 Desgaste erosivo

De acordo com o (ASM Metals Handbook, 1994), o desgaste erosivo é definido como: “perda progressiva de material original de uma superfície sólida devido à interação mecânica entre a superfície e o fluido, um fluido multicomponente, líquido incidente ou partículas sólidas”.

Em turbinas para hidro geração, alguns autores (Duan, et al., 2002) fazem referência ao termo erosão hidro abrasiva (*hydroabrasive erosion*). De qualquer forma, mais importante que as definições específicas é a compreensão dos mecanismos que envolvem o desgaste, bem como o modo como os componentes das turbinas hidráulicas são afetados.

A perda de material por desgaste erosivo pode ser separada em dois mecanismos básicos: deformação plástica ou fratura frágil. A definição de qual mecanismo agirá preponderantemente dependerá dos materiais envolvidos e das condições de desgaste.

3.2.1 Modelos de erosão

Para o mecanismo de desgaste por deformação plástica, o modelo existente em (Hutchings, 1992) relaciona a massa removida com a massa da partícula erosiva e a dureza do material erodido, conforme ilustra a equação 2:

$$\text{massa removida} = K. \rho. \frac{m. U^2}{H} \quad \text{Eq. 2}$$

Onde K é uma constante adimensional, m é a massa da partícula erosiva, U a velocidade da partícula erosiva, H a dureza do material erodido e ρ a densidade do material erodido.

A equação 2 não considera o modo de desgaste de forma direta e sim relaciona as energias através do equacionamento da energia cinética da partícula erosiva igualada com a energia resultante da deformação do material erodido. A correlação

entre o mecanismo de desgaste e a equação 2 é realizada de forma indireta através da constante K , a qual é obtida de forma experimental. A eficácia de cada modo de remoção, bem como a influência do ângulo de impacto também são consideradas de forma indireta pela constante K da equação 2. Em consequência, K resulta de dados experimentais para condições específicas dificultando a comparação de condições não similares de desgaste.

Outra abordagem encontrada na literatura é o equacionamento das taxas de desgaste baseadas na discussão dos modos de desgaste. Para um material dúctil os modos são:

- Sulcamento (*ploughing*, figura 9a): favorecida por partículas abrasivas arredondadas, onde a deformação do material erodido ocorre para os lados e à frente da partícula erosiva durante o impacto. A remoção de material se deve ao processo de fadiga com impactos sucessivos à superfície.
- Corte tipo I (figura 9b): favorecida por partículas abrasivas angulares, onde ocorre deformação do material erodido e formação de uma proa que é facilmente removida, ou remoção direta de material por corte.
- Corte tipo II (figura 9c): causada por condições muito específicas de partículas e orientações de impacto.

Figura 9 – Modos de dano por impacto em um material dúctil

Fonte: (Hutchings, 1992)

O trabalho executado por (Malik, et al., 2014) valida o modelo preditivo proposto por (Oka, et al., 2005) comparando as taxas de desgaste encontradas em materiais dúcteis. O modelo de (Oka, et al., 2005) é apresentado pelas equações 3 e 4.

$$E(\alpha) = g(\alpha) \cdot k \cdot (a \cdot H_V)^{k_1 \cdot b} \cdot \left(\frac{v}{v'}\right)^{k_2} \cdot \left(\frac{D}{D'}\right)^{k_3} \quad \text{Eq. 3}$$

$$g(\alpha) = (\sin \alpha)^{n_1} \cdot (1 + H_V \cdot (1 - \sin \alpha))^{n_2} \quad \text{Eq. 4}$$

Onde k , k_1 e k_3 são constantes que dependem da partícula erosiva; α é o ângulo de impacto da partícula erosiva, H_V é a dureza do material erodido; k_2 , n_1 e n_2 são constantes que dependem da partícula erosiva e dureza do material erodido; a e b são coeficientes que dependem da relaxação do material durante o teste de dureza; v é a velocidade da partícula erosiva; v' é a velocidade de referência dos dados experimentais; D é o tamanho médio da partícula erosiva; D' é o tamanho médio da partícula erosiva de referência dos dados experimentais.

A equação 4 considera o efeito do ângulo de impacto e depende também de características da partícula erosiva e material erodido. Com um ângulo de 90° o valor de $g(\alpha)$ é igual a 1 e isso se deve ao restante da equação 3 considerar o desgaste à 90° . Para ângulos menores que 90° há um aumento de $g(\alpha)$ e após um certo limite, definido pela dureza (H_V) e as constantes n_1 e n_2 , há um queda, o que é esperado para desgaste em materiais dúcteis, os quais geralmente possuem maior taxa de desgaste ao redor de 30° .

Do ponto de vista do fenômeno, as equações 2 e 3 são equivalentes, uma vez que a dureza do material erodido continua inversamente proporcional à taxa de desgaste, pois $b \geq 0$ e $k_1 < 0$, e a velocidade da partícula erodida exerce uma influência proporcional elevada a k_2 , que varia entre 2 e 3. O restante dos parâmetros encontrados na equação 3 são correlacionados de forma indireta na constante K da equação 2.

A estimativa da taxa de erosão baseada no trabalho de (Oka, et al., 2005) necessita da compreensão da similaridade entre o tipo de partícula erosiva utilizada nos

experimentos do autor para determinar as constantes relativas à partícula erosiva. Também é necessário fazer um teste de dureza para determinação dos coeficientes a e b . No entanto, como foram executados testes em três aços inoxidáveis martensíticos (S3 a S5), será necessário verificar se as referências possuem resultados compatíveis com o presente estudo, uma vez que não são citadas as composições químicas e tratamentos térmicos dos aços inoxidáveis martensíticos.

Conforme pode ser visto em (Duan, et al., 2002), partículas erosivas com arestas mais acentuadas causam maior desgaste erosivo. No entanto, há dificuldade em avaliar esse valor quantitativamente, pois durante o percurso há alteração no formato das partículas devido às colisões mútuas e arraste das partículas sobre a superfície.

No trabalho realizado por (Oka, et al., 2005) – parte 1 é feito um estudo com dióxido de silício de dois lotes diferentes e microesfera de vidro. A morfologia e as características mecânicas das partículas erosivas influem no coeficiente k_2 da equação 3. Segundo o autor, no caso de k_2 , mesmo com dois lotes diferentes de SiO_2 , não houve mudança significativa devido à morfologia ser a mesma para todas as partículas, ou seja, ser uma distribuição estatística.

No presente trabalho não foram feitas maiores considerações da morfologia da partícula erosiva devido às simplificações do modelo de (Oka, et al., 2005), que utiliza as considerações de morfologia acima e também pelo presente trabalho utilizar o mesmo tipo de partícula erosiva para todos os ensaios.

No mecanismo de desgaste definido por fratura frágil, os modelos existentes em (Hutchings, 1992) se baseiam em modelos empíricos e relacionam o volume de material removido com propriedades mecânicas do material erodido e com o tamanho e velocidade do abrasivo (modelo dinâmico), conforme ilustra a equação 5:

$$E_m \propto r^{0.7} \cdot U^{3.2} \cdot \frac{\varepsilon^{0.6}}{K_C^{1.3} \cdot H^{0.25}} \quad \text{Eq. 5}$$

Onde r é o raio da partícula erosiva, K_c é a tenacidade do material erodido, ε é a densidade da partícula erosiva, U é a velocidade da partícula erosiva e E_m é o volume removido por unidade de massa das partículas abrasivas.

Em materiais frágeis, a maior remoção de material ocorre por trincas. Por essa razão, a taxa de erosão depende mais da tenacidade à fratura do material erodido do que da dureza.

A taxa de erosão não depende somente dos materiais envolvidos, mas também de como ocorre a condição de contato. No caso de desgaste erosivo, a figura 10 ilustra as forças de contato durante o processo.

Relacionando o ângulo de impacto, o mecanismo de desgaste e as forças envolvidas, conforme ilustra a figura 10, pode-se dizer que o desgaste por deformação plástica é mais acentuado quando o ângulo de impacto está em torno de 30° (dependendo mais da força de arraste e contato) e o desgaste por fratura frágil é mais acentuado quando o ângulo é de 90° (dependendo predominantemente da força de contato). Por essa razão, na literatura os materiais são testados nesses ângulos ou próximos deles. (Hutchings, 1992)

Figura 10 – Forças envolvidas durante o processo de erosão

Adaptado de: (Hutchings, 1992)

3.2.2 Desgaste erosivo em turbinas para hidro geração

Geralmente, os tipos de rotores que apresentam maiores problemas com desgaste erosivo são rotores do tipo Pelton, Francis de alta queda e alguns casos de rotores Kaplan, principalmente quando o conteúdo de sedimentos é alto. (Thapa, 2004) (Neopane, 2010) (Duan, et al., 2002)

O desgaste erosivo em turbinas altera a geometria do rotor, independente do seu tipo, e em consequência leva à perda de eficiência e, em casos mais graves, à problemas estruturais na peça (trincas e até perda de componentes por propagação de trincas).

O desgaste impacta diretamente nos custos de produção de energia. Estes custos ocorrem através da perda de eficiência (levando a um maior gasto de água para produção da mesma quantidade de energia) ou através da parada obrigatória para reparos (levando a custo de reparo, custos de perdas de produção e até multas governamentais).

3.2.2.1 Desgaste em turbina tipo Pelton

De acordo com (Duan, et al., 2002), os rotores do tipo Pelton possuem uma velocidade dos jatos de água na ordem de 100 m/s, acelerações da água normais à superfície da concha da ordem de 50000 m/s^2 e desgaste erosivo mais severo na região de separação da água e também do fundo da concha para saída.

O alto valor de aceleração indica uma mudança brusca na velocidade que pode ocorrer tanto em seu módulo como em sua direção. A mudança na velocidade de escoamento não é acompanhada imediatamente pelas partículas de sedimentos presentes na água. A mudança de trajetória das partículas depende da sua velocidade e massa que somadas às diferentes velocidades e acelerações do escoamento da água ocasionam separação de sedimentos.

As diferentes taxas de desgaste na superfície de uma concha Pelton ocorrem devido às diferentes condições de impacto durante o funcionamento da turbina, que

resultam da rotação da turbina somada à separação dos sedimentos por diferentes acelerações da água durante a passagem pela concha. Esse fato é ilustrado pela figura 11, que indica maior incidência de colisões das partículas maiores na região de entrada da concha (septo ou em inglês *splitter*) até o meio. Por sua vez, as partículas de menor tamanho tendem a colidir do meio para a saída. (Thapa, 2004)

Os sedimentos existentes nas águas dos rios apresentam faixas de tamanhos específicos, bem como diferentes composições químicas. Em consequência, as regiões de maior desgaste em um rotor tendem a variar conforme o projeto da turbina e sua localização ao longo do rio.

Figura 11 – Movimentação de sedimentos em turbinas Pelton

Adaptado de: (Thapa, 2004)

Uma melhor compreensão dos mecanismos de desgaste em rotores Pelton pode ser obtida através do trabalho realizado por (Padhy, et al., 2012), no qual foi utilizado um modelo em escala de bronze com uma velocidade de jato de 28.56 m/s e sedimentos retirados de um rio na Índia. Nesse estudo foram utilizadas quatro granulações separadas do rio: 255-350 μm , 180-250 μm , 90-180 μm e menores que 90 μm . Um exemplo de dano obtido com as partículas granuladas 255-350 μm é dado pela figura 12, onde é possível observar o desgaste observado na entrada, fundo e saída da concha.

O mecanismo de desgaste observado é por deformação plástica no modo de sulcamento e corte I. Também pode-se observar o modelo de desgaste relacionado ao tamanho de partículas proposto por (Thapa, 2004) e visualizado na figura 11,

onde o desgaste na aresta de entrada (também conhecida como *splitter*) até o fundo da concha é dado em grande parte por partículas maiores e próximo a borda da saída é devido em grande parte a partículas menores.

Para as condições de jato a 28.56 m/s e sedimentos com tamanho médio de 302 μm observa-se que na entrada (figura 12a₁) há deformações pouco profundas, que podem ser originadas por impactos com ângulos menores que 22.5° e também sulcamentos. No fundo da concha (figura 12b₁) observa-se uma maior incidência de danos e impactos a 90° dados por deformações pontuais, eventuais remoções por fadiga e sulcamento. Na saída (figura 12c₁), observa-se uma menor densidade de danos e impactos a 90°, bem como sulcamentos.

As mesmas condições de escoamento foram aplicadas a sedimentos com tamanho médio de 135 μm e 45 μm conforme mostram as figuras 12a₂ a 12c₂ e figuras 12a₃ a 12c₃. Comparando o tamanho médio de 302 μm e 135 μm , há menor incidência de impactos na entrada (a), no entanto, maior no fundo da concha (b) e aresta de saída (c). A comparação do tamanho médio de 135 μm e 45 μm não mostra diferença em quantidade de impactos na entrada (a), mas mostra uma menor incidência de impactos no fundo da concha (b) e saída (c).

Figura 12 – Modos de remoção em um rotor Pelton (sedimentos de tamanho médio de: 1 – 302 μm ; 2 – 135 μm ; 3 – 45 μm): a – Entrada (splitter), b – fundo da concha e c – aresta de saída

Adaptado de: (Padhy, et al., 2012)

Através de um exemplo de desgaste erosivo severo na usina hidrelétrica de Alfalfal I, localizada no Chile (figura 13), é possível verificar os efeitos do desgaste erosivo em macro escala, onde, no caso dessa turbina há maior desgaste nas arestas de entrada e fundo da concha para saída.

Figura 13 – Desgaste em turbina Pelton sem revestimento após 38000t de sedimento

Fonte: (Winkler, 2014)

Como forma de mitigar o problema de desgaste, mas não eliminá-lo, nos rotores são empregados revestimentos sobre a superfície da turbina. Em geral, os revestimentos utilizados em turbinas Pelton são de WC-Co-Cr aplicados por processo de HVOF.

Um exemplo de eficácia dos revestimentos está no rotor Pelton de Alfalfal I, ilustrado pelas figuras 13 e 14. Na figura 13 é apresentado um rotor sem revestimento que operou com 38000 t de sedimento e na figura 14 é apresentado o mesmo rotor, agora revestido, que operou com 120000 t de sedimento.

Figura 14 – Desgaste em turbina Pelton com revestimento após 120000t de sedimento

Fonte: (Winkler, 2014)

Outra maneira de se visualizar o dano é através da perda de eficiência que se deve ao aumento de espessura no septo. Aproximadamente 1% de aumento na espessura leva à perda de 1% de eficiência do rotor. (Duan, et al., 2002)

A eficiência não é somente influenciada pela geometria da entrada (septo), mas também pela geometria de saída. O rotor é projetado para que o fluxo da água saia paralelo à próxima concha, conforme ilustra a figura 4, evitando assim um efeito de freio sobre as conchas.

Outro componente da máquina Pelton que sofre desgaste é o injetor. Mais precisamente, na agulha e anel de vedação, ocorre desgaste erosivo mais severo, conforme ilustra a figura 15. Estes componentes geralmente são revestidos com o mesmo material do rotor.

Figura 15 – Desgaste em uma agulha de injetor

Fonte: (Duan, et al., 2002)

3.2.2.2 Desgaste em turbina tipo Francis

As turbinas do tipo Francis, projetadas para altas quedas, possuem maior desgaste erosivo (entre seus tipos) devido às altas velocidades e acelerações de escoamento. (Duan, et al., 2002)

Na máquina tipo Francis, as maiores velocidades de escoamento absolutas e maiores acelerações absolutas estão na saída das palhetas diretoras (figura 16) e no lado de pressão das pás do rotor Francis (figura 17), conforme indicado em (Duan, et al., 2002). A maior velocidade relativa de escoamento é encontrada na aresta de saída das pás dos rotores Francis, conforme ilustra a figura 17.

Em turbinas Francis operando em alta queda, as velocidades absolutas de escoamento podem chegar a 85-95 m/s na aresta de entrada. E a maior velocidade relativa está na ordem de 40 m/s. (Neopane, 2010)

Conforme visto em (Duan, et al., 2002), o maior dano pode ocorrer também na aresta de entrada e ao longo da junção com a coroa do rotor (figura 18), devido à alta aceleração relativa que ocorre em conjunto com a alta velocidade de escoamento.

Figura 16 – Desgaste erosivo em palhetas diretrizes - Himalaya

Fonte: (Thapa, et al., 2012)

Figura 17 – Desgaste erosivo em turbina Francis - Himalaya

Fonte: (Thapa, et al., 2012)

Figura 18 – Desgaste erosivo nas arestas de entrada das pás

Fonte: (Espinoza, 2016)

Conforme pode ser visto em (Ramírez, et al., 2016) e (Saeed, et al., 2010), em pás do tipo Francis, a região de menor espessura e maior concentração de tensões se encontra na aresta de saída próxima ao cubo ou à coroa. Esse fato torna comum a ocorrência de trincas devido à redução de espessura da aresta de saída, levando a uma necessidade de manutenção precoce.

Observando do ponto de vista de eficiência, conforme (Thapa, 2004), a perda de eficiência em máquinas Francis, devido ao desgaste, se deve a três principais razões:

- Aumento da folga entre tampa da turbina e palhetas diretrizes, anel inferior (aro de saída) e palhetas diretrizes;
- Perda por atrito devido ao aumento da rugosidade das passagens d'água;
- Vazamentos nos anéis de vedação.

Dentre os itens acima, o que mais influencia a perda de eficiência é a folga entre as palhetas diretrizes e tampa da turbina e anel de saída (aro de saída). O aumento da folga em duas vezes provoca uma perda de eficiência da ordem de 1%. (Thapa, 2004)

3.2.2.3 Desgaste em turbina tipo Kaplan

As turbinas do tipo Kaplan apresentam maior dano por erosão quando há altas concentrações de sedimentos na água. (Thapa, 2004)

As regiões de maior desgaste erosivo em turbinas Kaplan variam de projeto para projeto. No entanto, pelas figuras 19, 20 e 21 pode-se dizer que a região de maior desgaste será encontrada mais próxima ao diâmetro externo do rotor entre as arestas de entrada e saída. (Thapa, 2004) (Rai, et al., 2016) e (Liang, 2015)

Figura 19 – Região de maior desgaste

Fonte: (Thapa, 2004)

Figura 20 – Região de maior desgaste em Kaplan

Adaptado de: (Rai, et al., 2016)

Figura 21 – Erosão em turbina Kaplan H = 18-21.5m

Fonte: (Liang, 2015)

3.3 Processos de aspersão térmica

O processo de aspersão térmica é definido pela (ASM Metals Handbook, 1994) como: “um grupo de processos nos quais materiais metálicos ou não metálicos divididos finamente são depositados numa condição fundida ou semifundida sobre um substrato para formar um depósito por aspersão. O material superficial pode ser na forma de pó, barra, cordão ou arame.”

Figura 22 – Processos de aspersão térmica

Adaptado de: (Schneider, et al., 2006)

Conforme ilustrado pela figura 22, no mercado existem diversos tipos de processos para revestimento por aspersão térmica, que devem ser selecionados conforme a aplicação. A tabela 1 ilustra as temperaturas que podem chegar as principais fontes de calor para o processo de aspersão térmica e a figura 23 a velocidade de trabalho para alguns dos processos.

Tabela 1 – Fontes de calor e sua temperatura

Fonte	Temperatura (°C)	Temperatura (°F)
Propano, oxigênio	2 526 – 2 640	4 579 – 4 785
Gás natural, oxigênio	2 538 – 2 735	4 600 – 4 955
Hidrogênio, oxigênio	2 660 – 2 690	4 820 – 4 875
Propileno, oxigênio	2 843	5 240
MAPP, oxigênio	2 927	5 301
Acetileno, oxigênio	3 087 – 3 100	5 589 – 5 625
Arco plasma	2 200 – 28 000	4 000 – 50 000

Fonte: (Lima, et al., 2007)

Figura 23 – Velocidade da partícula por processo

Fonte: (Lima, et al., 2007)

3.3.1 Processos por HVOF

Conforme (Sulzer Metco, 2000), o processo HVOF “usa oxigênio e gás combustível para produzir um escoamento de alta velocidade no bico da pistola. Este escoamento de gás, quando queimado na saída da pistola, se torna uma chama luminosa branca e transônica que tem ondas de choque em forma de losango (por essa razão os equipamentos da Sulzer Metco se chamam Diamond Jet). Esta chama funde a parte metálica do pó injetado sobre ela, então acelera as partículas do pó sobre a peça, para formar um revestimento denso e com excelente adesão.”

A figura 24 mostra a região onde flui o hidrogênio (vermelho), oxigênio (amarelo), ar comprimido (verde) e mistura dos gases (laranja). A figura também ilustra os componentes de uma pistola de HVOF, que são:

- Bico: em sua parte mais externa o oxigênio e combustível são misturados e passados para a capa de ar. No seu centro há passagem de nitrogênio com o pó para revestimento que é carregado para a capa de ar.
- Injetor de pó: conecta a entrada de pó com nitrogênio para a saída do bico.
- Capa de ar: internamente possui um formato cônico parecido com bico de Venturi. É a peça onde ocorre a combustão do processo de HVOF e onde o pó inicia o seu aquecimento.
- Corpo da capa de ar: envolve a capa de ar e fornece fluxo de água ou ar para resfriamento da capa de ar.

Figura 24 – Esquema básico da pistola do processo por HVOF

Fonte: (Sulzer Metco, 2000)

A pistola impulsiona as partículas de pó e funde sua parte metálica durante o processo. A composição de diversas partículas solidificadas (em formato de lamelas) é o revestimento aspergido, conforme ilustra figura 25.

Figura 25 – Revestimento por aspersão térmica

Fonte: (Bergman, et al., 2011)

“No caso dos equipamentos Diamond Jet, estes combinam um processo de HVOF e HVOF (processo onde o comburente não é o oxigênio puro, mas o ar comprimido).

Isso é possível acrescentando ar comprimido para manter o pó acumulado na chama circular, e controlando o aquecimento da partícula.” (Sulzer Metco, 2000)

O processo utilizado nesse trabalho será o HVOF (*High Velocity Oxy-Fuel*), que apresenta velocidades de 450 a 1200 m/s, e o gás de combustão utilizado será o hidrogênio, que como fonte de calor, proporciona uma temperatura de chama de 2660-2690 °C.

Dentre as vantagens do processo HVOF podem ser citadas a formação de revestimentos mais densos, i.e. com uma quantidade menor de porosidades se comparados a outros processos (*flame-spraying, electric arc-spraying, atmospheric plasma spraying*) e uma maior adesão. (Schneider, et al., 2006)

A figura 26 indica que quanto maior a temperatura e menor a velocidade da partícula, maior a tendência de tensões residuais trativas, e que quanto menor a temperatura e maior a velocidade das partículas, maior a tendência de tensões residuais compressivas. No caso de tensões residuais compressivas há vantagem para a qualidade do revestimento, pois trincas são mais difíceis de se propagar em meios compressivos.

Na figura 26 os processos de aspersão térmica são indicados pela designação comercial do equipamento. Os principais processos HVOF utilizados na indústria estão listados abaixo, os quais diferem em termos de tipo de combustível:

- DJ 2600 (verde): processo a hidrogênio;
- DJ 2700 (azul): processo a gás natural, propano ou propileno;
- Wokajet 400 e JP 5000 (vermelho): processo a querosene.

Figura 26 - Tensões residuais do processo

Adaptado de: (Sulzer Metco; Brastak, 2006)

3.3.1.1 Formação do revestimento

Como resultado do processo, o revestimento é formado por lamelas de partículas solidificadas, porosidades, micro cavidades, micro trincas e inclusões de óxidos, conforme ilustram as figuras 27 e 28.

Figura 27 – Estrutura de um revestimento aspergido

Fonte: (Krepski, 1993) apud (Lima, et al., 2007)

Figura 28 – Exemplo de estrutura do 80Ni20Cr

Fonte: (Bergman, et al., 2011)

Em termos do processo, é importante ressaltar que o critério básico para aplicação de revestimentos é que a partícula deve se fundir antes de atingir a superfície de aplicação (Lima, 1996) apud (Lima, et al., 2007).

Partindo do critério básico, é importante o conhecimento da origem dos defeitos típicos para otimização do revestimento. Assim, por exemplo, porosidades podem ser úteis no aumento da resistência térmica entre o material base e o ambiente, e ao mesmo tempo serem indesejadas do ponto de vista de propriedades mecânicas para melhoria da resistência ao desgaste.

Conforme visto em (Lima, et al., 2007) e (McPherson, 1989) as porosidades tem duas origens básicas: partículas não totalmente fundidas que impactam no processo e micro cavidades (em torno de $0.1 \mu\text{m}$) que são inerentes ao processo e se devem à falta de contato entre as lamelas.

Como forma de avaliar as porosidades em revestimento existe a norma (ASTM B276, 2010). No entanto, um cuidado especial deve ser tomado durante a preparação da amostra, como, por exemplo, em termos da pressão durante o processo de polimento. A preparação pode ocasionar variação na avaliação, pois dependendo da pressão durante o polimento há maior ou menor remoção de partículas não totalmente aderidas. Um modo de minimizar esses efeitos do polimento sobre o revestimento é impregná-lo com resina epóxi antes do polimento e mesmo assim como pode ser visto em (Schneider, et al., 2006), há variação na preparação da amostra.

As porosidades degradam as propriedades mecânicas do revestimento e, em especial, como será visto no capítulo 3.4.5, há uma correlação entre porosidade e dureza. Tal correlação faz sentido, uma vez que poros próximos da região de medição de dureza facilitam a deformação do material, resultando em uma leitura de dureza menor. Dessa forma, a dureza pode ser utilizada como parâmetro de qualidade para avaliação do revestimento.

A oxidação das partículas do revestimento durante sua solidificação dificulta o espalhamento, conforme ilustra a figura 29, onde há uma comparação entre o impacto de uma partícula aspergida por processo a plasma no ar (a) e uma partícula aspergida por processo a plasma no vácuo (b). A partícula aspergida na presença de ar possui um espalhamento em estrela que é diferente do espalhamento circular de uma partícula aspergida em vácuo, onde não há formação de óxido devido ao

ambiente. Em consequência, a presença de ar ocasiona oxidação que pode influenciar a coesão entre camadas de revestimento. Segundo (Sampath, et al., 1996), a oxidação da partícula altera sua viscosidade e consequentemente seu espalhamento.

Figura 29 – Aspersão de uma partícula – (a) APS; (b) VPS

Fonte: (Sampath, et al., 1996)

A oxidação superficial do substrato prejudica também o espalhamento da partícula, pois modifica a rugosidade superficial e molhamento do líquido conforme trabalho feito por (Vardelle, et al., 1994) apud (Lima, et al., 2007).

As micro trincas são comuns em revestimentos cerâmicos e são formadas pela contração térmica do material durante o resfriamento. Estas trincas geralmente aparecem no plano perpendicular às lamelas, sendo benéficas em alguns casos. (Lima, 1996)

3.3.2 Parâmetros de processo

Para a aplicação de um revestimento por processo de HVOF, deve-se controlar desde o tratamento prévio da superfície (com lavagem superficial, pré-jateamento, reparos de porosidades e jateamento final) até os parâmetros de aplicação de processo (temperatura de pré-aquecimento, pressão e vazão dos gases que alimentam a pistola, taxa de alimentação de pó, distância de aplicação, temperatura de interpasse e espessura de camada). Estes controles serão mais detalhados a seguir, do ponto de vista de sua influência durante a aplicação e resultado final do revestimento.

3.3.2.1 Adesão e parâmetros de processo

A adesão do revestimento está diretamente atrelada à sua resistência em qualquer tipo de aplicação. De acordo com (Lima, et al., 2007), a interação superficial entre o revestimento e o substrato se dá 70 a 80% de maneira física e o restante é dado por regiões com interação químicas metalúrgicas (difusão e reação química lamela/lamela e lamela/substrato, adsorção química e epitaxia).

Como grande parte da interação com a superfície ocorre fisicamente, deve-se levar em consideração dois pontos: a formação de asperezas na superfície, a qual permite ancoragem, conforme ilustra a figura 30 (durante o resfriamento das partículas ocorre contração que provoca uma força conforme ilustrada pelas setas na figura) e como será o espalhamento das partículas, que será discutido mais adiante.

Figura 30 – Ancoragem mecânica das lamelas sobre o substrato

Fonte: (Lima, et al., 2007)

A ancoragem mecânica do revestimento está relacionada à preparação da superfície por jateamento e, conforme a teoria apresentada por (Lima, et al., 2007) e (Schneider, et al., 2006), a interface entre substrato e revestimento deve ser preparada de forma a ter-se remoção de impurezas e formação de asperezas.

Em contrapartida, um estudo realizado por (Barr, et al., 2013), levou em consideração as principais contaminações que ocorrem em um ambiente fabril: exposição da superfície ao ambiente, graxa de rolamento, impressão digital e óleo WD-40. Mesmo com as contaminações iniciais sobre a superfície jateada do substrato, não houve mudança perceptível no valor da adesão. Esse fato é explicado pelo processo de HVOF, no qual a temperatura medida na chama é da ordem de

1700°C e a velocidade das partículas da ordem de 450 m/s, ocasionando combustão/sublimação das contaminações e sua remoção ao mesmo tempo.

Voltando à formação de asperezas, geralmente a rugosidade ideal está entre 2.5 e 13 μm e a adesão geralmente aumenta com a rugosidade da superfície. No entanto, essa melhoria diminui para R_a superior a 10 μm . (Lima, et al., 2007).

Para um revestimento de WC-Co com partículas de pó +15/-53 μm , aplicado por processo de HVOF a propano, foi constatado por (Wang, et al., 2005), baseando-se no teste de adesão da (ASTM C633-01, 2013), que a partir de uma rugosidade de 5.8 μm a adesão supera 70 MPa. Adicionalmente se a rugosidade for menor que 1.7 μm R_a , a adesão reduz-se para valores entre 25-40 MPa.

Com a preparação adequada da superfície, o próximo ponto que influi na adesão é o espalhamento das partículas durante sua solidificação, que está atrelado aos parâmetros do processo de revestimento, como energia liberada na combustão na forma de calor e aceleração das partículas, distância de aplicação e temperatura de pré-aquecimento.

O formato do espalhamento da partícula está associado a uma maior ou menor adesão. Por exemplo, na figura 31a há mais regiões onde a partícula se aloca em regiões convexas, no entanto, grande parte desse contato se dá por regiões pequenas da partícula. Já na figura 31b, há uma porção maior da partícula sobre a região convexa, conferindo maior resistência mecânica, e, por consequência maior adesão.

Figura 31 – Espalhamento da partícula de revestimento: (a) estrela; (b) circular

Considerando que os parâmetros de aplicação dos gases sejam adequados, o que resta é alterar a temperatura de pré-aquecimento do substrato, a qual influi diretamente na solidificação das partículas que impactam sobre a superfície do material base.

A influência do pré-aquecimento, discutida por (Mellali, et al., 1996), vai ao encontro ao que é dito no trabalho realizado por (Hasui, et al., 1970) apud (Lima, et al., 2007), no qual uma gotícula foi aspergida em função da temperatura do substrato, para as temperaturas de 150°C (figura 32a) e 250°C (figura 32b). Para a temperatura de 150°C houve uma solidificação em formato de estrela e para 250°C houve um espalhamento mais uniforme em formato circular, evidenciando a mudança de formato com a temperatura.

Para o modelo de adesão mecânica descrito anteriormente, quanto mais arredondado for o espalhamento da partícula, melhor a adesão desta sobre o substrato.

Figura 32 – Influência da temperatura do substrato (a – 150°C, b – 250°C)

Fonte: (Lima, et al., 2007)

É importante ressaltar que as temperaturas descritas acima valem especificamente para o material utilizado nos estudos dos autores acima. Trabalhar com um pré-aquecimento na ordem de 250°C com o WC-Co-Cr não é recomendado pelos fabricantes do pó de revestimento. O que se pode extrair dos estudos é a influência qualitativa da temperatura de pré-aquecimento.

3.4 Materiais cerâmicos e metálicos (cermets)

O revestimento utilizado nesse trabalho será o WC-10Co-4Cr, que é comumente classificado como *cermet* (cerâmico-metálico), e é composto por partículas cerâmicas de carboneto de tungstênio (WC) interligadas por uma matriz (*binder*) de cobalto e cromo.

Os *cermets* são um tipo de material compósito, o qual é definido como um material que possui duas ou mais fases física ou quimicamente interligadas. “Geralmente, a fase contínua é denominada matriz, enquanto a fase distribuída é denominada reforço. Três itens determinam as características de um compósito: o reforço, a matriz e a interface entre eles.” (Meyers, et al., 2009)

A aplicação do WC-10Co4Cr em hidro geradores é por vezes feita por intermédio do processo de HVOF (discutido anteriormente), utilizando, por exemplo, o pó aglomerado e sinterizado conforme a figura 33. A composição química nominal do pó é de 86 % de WC, 10 % de Co e 4% de cromo.

Figura 33 – Micrografia do pó de WC-10Co4Cr típica

Fonte: (GTV Verschleiss-Schutz GmbH, 2012)

Os controles de qualidade executados no revestimento final de WC-10Co4Cr são a espessura de camada (ASTM B499, 2009) e a rugosidade Ra (DIN EN ISO 4288, 1996). Outros parâmetros são medidos por meio de corpos de prova específicos, como, por exemplo, para análise de adesão (ASTM C633-01, 2013) e dureza (DIN EN ISO 6507, 2005).

Para avaliação da adesão, existe o ensaio conforme (ASTM C633-01, 2013), que consiste em aplicar o revestimento sobre um corpo de prova com o mesmo material do substrato e colar um contra corpo para tracionar o conjunto, conforme ilustra a figura 34.

Adaptado de: (Lima, et al., 2007)

O ensaio de adesão da (ASTM C633-01, 2013) produz basicamente três tipos de resultados, dependendo de como ocorre o desprendimento do material. Se o desprendimento do revestimento é completo (falha adesiva, conforme ilustra a figura 34c), pode-se dizer que foi medida a adesão limite do revestimento sobre o substrato. Caso só ocorra desprendimento do adesivo (conforme ilustra a figura 34a), o valor é a adesão mínima do revestimento, conforme visto em (Maranho, 2006). Por fim, caso ocorra uma falha coesiva (conforme ilustra a figura 34b), o valor de adesão medido é o entre camadas do revestimento e pode ser considerado como adesão mínima do revestimento para o substrato.

3.4.1 Modo de remoção do WC-Co

O material WC-10Co-4Cr apresenta em sua estrutura materiais com características frágeis e dúcteis, o que confere ao material um comportamento diferenciado se comparado aos seus componentes individuais.

O comportamento do *cermet* não se deve somente à sua composição química antes do processo de aplicação, mas às transformações no material durante o processo de fabricação.

Em (Verdon, et al., 1997), pode-se ver que o processo HVOF utilizando hidrogênio como gás combustível provoca maior descarbonetação do WC (perda de carbono de 45% para o processo a hidrogênio e 19% para o processo com propano), com parte do WC passando a W_2C , se comparado ao processo utilizando propano. Apesar da quantidade de W_2C observada ser maior no processo a hidrogênio (25% em massa relativo à parte cristalina do revestimento para o processo a hidrogênio contra 21% em massa para o processo a propano), a resistência ao desgaste do processo a hidrogênio é maior que a do processo a propano, mostrando que as transformações do carboneto, bem como do dos materiais ligantes, podem ser benéficas ao revestimento em desgaste erosivo. Em resumo, considerando a resistência ao desgaste erosivo há um ponto ótimo entre a quantidade de WC e o volume da fase ligante ou *binder*, e há um ponto ótimo na região redor dos grãos de carbeto onde pode se ter contornos mais frágeis ou coesão maior ao redor dos grãos de WC.

Quando ocorre processo de erosão com abrasivo em meio aquoso sobre o carboneto de tungstênio, pode-se ver através de (Gant, et al., 2015), (Verdon, et al., 1997) e (Goyal, et al., 2012) que a remoção de material ocorre pelos seguintes mecanismos:

- Sulcamento (*ploughing*) e micro cortes sobre a região da matriz;
- Delaminação ocorrida por intermédio de trincas que propagam através da matriz;
- Corrosão da matriz;

Segundo (Verdon, et al., 1997), não foi encontrada mudança no mecanismo de desgaste dominante (sulcamento) até a velocidade de escoamento testada de 140 m/s para o revestimento de WC-12Co aplicado com hidrogênio. No entanto, a mudança do processo de aplicação do revestimento de um sistema a hidrogênio para propano faz com que o mecanismo predominante (sulcamento) mude na velocidade de 90 m/s passando para o mecanismo dominante de delaminação por intermédio de trincas.

O trabalho realizado por (Goyal, et al., 2012) com o revestimento de WC-10Co-4Cr aplicado com propano mostra que o mecanismo de remoção por erosão tem um comportamento misto, i.e. frágil e dúctil com predominância dúctil. O desgaste erosivo ocorre com o ataque das partículas erosivas na matriz do revestimento, por meio de micro cortes e *ploughing*. A deformação plástica causada na matriz facilita a posterior remoção das partículas de WC, conforme ilustra a figura 35.

Figura 35 – MEV da superfície erodida (2250 rpm, 30000 ppm e tamanho médio da partícula erosiva de 300 μ m)

Adaptado de: (Goyal, et al., 2012)

O trabalho executado por (Santa, et al., 2009) para o revestimento de WC-Co-Ni aplicado com metileno mostra que os modos de remoção por erosão são os mesmos que os encontrados por (Goyal, et al., 2012), conforme ilustra a figura 36.

Figura 36 – Desgaste erosivo no revestimento de WC-Co-Ni

Fonte: (Santa, et al., 2009)

Como o mecanismo dominante para o revestimento de WC-Co é o sulcamento ou micro cortes da matriz dúctil, espera-se que a variável de maior influência sobre a erosão do revestimento seja a dureza e o ângulo com maior desgaste ocorra próximo de 30° devido aos mecanismos serem de um material com característica dúctil, pois ângulos menores tem a componente da força de arraste maior o que pode ocasionar um maior comprimento deformado.

Na publicação de (Wheeler, et al., 2005), foram estudados diversos revestimentos e processos com relação à taxa de erosão e ângulo de incidência. Em especial, os revestimentos denominados Diatec 1086 e o D-Gun usaram pós com a mesma composição química do material utilizado nesse trabalho.

O revestimento Diatec 1086 foi aplicado pelo processo de HVOF e o tipo de gás e equipamentos utilizados não foram citados.

O revestimento D-Gun foi aplicado pelo processo *detonation gun*, que não é considerado um processo de HVOF, mas um precursor do mesmo. Nesse processo, o carboneto é inserido em uma câmara com combustões sucessivas, geralmente de acetileno.

O resultado pode ser visto na figura 37, onde o Diatec 1086 não possui um ângulo que apresentou maior desgaste e o D-Gun apresentou maior desgaste próximo a 45°.

Figura 37 – Taxa de desgaste e ângulo de impacto

Fonte: (Wheeler, et al., 2005)

A influência do processo sobre o ângulo onde o material é mais erodido também pode ser vista na figura 38, onde a amostra preparada pelo processo HVOF a propano (DJ) apresenta maior erosão que o processo HVAF (*high velocity air fuel* - AK) a propano. Este resultado era esperado, uma vez que o autor também mediu a dureza e tenacidade à fratura média dos revestimentos, chegando a valores maiores para o processo HVAF.

Figura 38 – Erosão do WC-10CoCr com SiO₂ (212-425µm) após 75 min

Fonte: (Wang, et al., 2015)

O importante é que quando se trata de revestimentos e processos, somente o ensaio a 30° e 90° não necessariamente traz consigo o valor da maior taxa de erosão, mas sim uma forma de entender o comportamento do material durante o desgaste erosivo.

3.4.2 Efeitos do processo de esmerilhamento sobre o WC-10Co-4Cr

Um dos itens importantes para o reparo de um revestimento é a remoção da região com problema, seja uma trinca ou um destacamento antes de um reparo. Este processo pode ser executado tanto por esmerilhamento/lixamento/retífica como por jateamento.

Vale salientar que na literatura só são encontrados casos onde o efeito do esmerilhamento (processo feito com disco de esmeril) em revestimento é feito somente na superfície após aspersão. A partir desse ponto o revestimento está em sua condição final de uso.

Dependendo da aplicação na qual é usado um revestimento de WC-10Co4Cr, deve-se executar esmerilhamento e polimento para atingir as rugosidades requeridas por projeto, e esse processo é feito com abrasivos diamantados.

Como forma de compreender o efeito do processo de esmerilhamento sobre o revestimento, foram levantados dois trabalhos: um relacionando esmerilhamento e desgaste erosivo, e outro relacionando esmerilhamento com tensões residuais e adesão do revestimento.

O efeito desse processo de esmerilhamento sobre a superfície de um corpo de prova revestido foi investigado por (Murthy, et al., 2001) do ponto de vista de desgaste erosivo, e sua relação com a microestrutura e as tensões residuais durante o processo. Após o processo de esmerilhamento do corpo de prova, as tensões compressivas aumentaram de três a cinco vezes e a taxa de erosão diminuiu quase pela metade, mostrando uma melhoria com o esmerilhamento, conforme mostra a figura 39. Nesta figura os autores comparam o uso ou não de polimento, ângulo de impacto e o desgaste no substrato.

No trabalho executado por (Murthy, et al., 2001), a granulação do pó utilizado (-53 +11 μm) não é a granulação correta para aplicação com o sistema DJ (DJ 2600 hidrogênio), mas pode ser ideal com o sistema de *detonation gun* (DS). Tal afirmação fica mais aparente ao comparar os valores de dureza encontrados pelo autor. No processo com DJ foi encontrada uma dureza de 792 HV_{0.3} e no processo com DS foi encontrada uma dureza de 849 HV_{0.3}. Já (Bolelli, et al., 2015) encontraram uma média de aproximadamente 1250 HV com um pó de granulação - 30 +5 μm aplicado com o processo DJ 2700 (propano). O valor encontrado por (Bolelli, et al., 2015) é muito maior que o valor encontrado no trabalho realizado por (Murthy, et al., 2001), o que indica que a granulação não é a correta para o sistema DJ com hidrogênio.

Como o revestimento foi executado com uma granulação não comum na literatura para o processo utilizado, pode ter ocorrido erro nos parâmetros de aplicação e consequentemente excesso de partículas com falta de fusão e porosidades. Estas características seriam capazes de explicar na figura 39, a maior taxa de remoção do revestimento se comparado com o material base (AISI 4043) a 90° e quase a mesma taxa de remoção entre ambos a 30°.

De qualquer forma, o estudo sobre o esmerilhamento é válido, uma vez que com aumento das tensões residuais compressivas se espera uma maior dificuldade de propagação de trincas e, em consequência, uma menor taxa de desgaste a 90°, a qual é mostrada pelos resultados da figura 39.

Figura 39 – Erosão do WC-10Co4Cr com SiO₂ (106-150 μm) e velocidade de 80 m/s

Fonte: (Murthy, et al., 2001)

Outro estudo para verificar o efeito do esmerilhamento / polimento do revestimento foi feito por (Masoumi, et al., 2014). Nesse trabalho, foram avaliadas: porosidades, tensões residuais (antes e depois), dureza do revestimento e medição de adesão. Apesar dos parâmetros do polimento não serem os mesmos utilizados no trabalho de (Murthy, et al., 2001), houve também aumento das tensões residuais compressivas do revestimento, que dobraram com o uso do polimento.

De acordo com (Masoumi, et al., 2014), o processo de esmerilhamento causa mudança nas tensões residuais através de três mecanismos: (I) deformação plástica causada por dilatação térmica localizada, (II) deformação plástica causada mecanicamente e (III) transformação de fase. Os mecanismos I e III foram descartados como hipótese, após o esmerilhamento, pois não são observadas mudanças de fase no revestimento e o esmerilhamento executado no revestimento utilizou fluido refrigerante.

A formação de tensões residuais compressivas ocorre devido à combinação entre a deformação elástica perpendicular à superfície (devido aos esforços de contato) e a deformação plástica causada na superfície, a qual impede que a deformação elástica se recupere totalmente. (Chen, et al., 2000)

3.4.3 Propriedades mecânicas e processo

No trabalho de (Bolelli, et al., 2015) foi executado um estudo do revestimento WC-10Co4Cr do ponto de vista de caracterização (influência de processo e tamanho de partícula de pó), propriedades mecânicas do revestimento e características tribológicas para ensaio de esfera sobre disco, e ensaio de abrasão roda de borracha.

A nomenclatura dos materiais e processos utilizados no trabalho de (Bolelli, et al., 2015) encontram-se nas tabelas 2 e 3.

Tabela 2 – Nomenclatura utilizada em (Bolelli, et al., 2015) para os pós

Composição (m%)	Designação	Granulação (mm)	Tipo de pó
WC-10Co4Cr	Amperit 558.059	-30 +5	W1
WC-10Co4Cr	Amperit 558.074	-45 +15	W2

Tabela 3 – Nomenclatura utilizada em (Bolelli, et al., 2015) para os processos

HVAF M3 (Propano)	HVOF JP5000 (Querosene)	HVOF DJ 2700 (Propano)	HVAF M2 (Metano)
P1W1	P2W1	P3W1	P4W1
P1W2	P2W2	P3W2	P4W2

De acordo com o estudo realizado em (Bolelli, et al., 2015), as durezas para os processos P1, P2 e P3 para o pó W1 ficaram aproximadamente as mesmas considerando-se os desvios padrões (figura 40). No entanto, a tenacidade (figura 41) e o módulo de elasticidade (figura 42), ficam maiores para o processo P1 do que para os outros. Possivelmente, a maior tenacidade no processo de HVAF com M3 se deve à menor transformação do WC em W_2C e também à quantidade de porosidades presentes no revestimento. Lembrando que a qualidade do processo depende do gás e também do tipo de processo utilizado.

Figura 40 – Medição de dureza para WC-10Co4Cr

Fonte: (Bolelli, et al., 2015)

Figura 41 – Medição de tenacidade do WC-10Co4Cr

Fonte: (Bolelli, et al., 2015)

Figura 42 - Medição do módulo de elasticidade do WC-10Co4Cr

Fonte: (Bolelli, et al., 2015)

3.4.4 Tensões residuais e parâmetros de processo

Um dos itens que provocam trincas e desprendimentos em revestimentos são as tensões residuais geradas durante o processo. Em (Gui, et al., 2012) foram estudados os parâmetros de aplicação do WC-10Co-Cr utilizando hidrogênio para aplicação e as tensões residuais foram medidas por meio do teste de Almen (SAE HS-84, 2001), o mesmo utilizado para determinar a intensidade de jato para o processo de *shot peening*.

O teste de Almen consiste em jatear a face de uma tira padrão, que por geração de tensões residuais, forma um arco, conforme ilustra a figura 43.

Nos ensaios realizados por (Gui, et al., 2012) foi utilizado o mesmo conceito, divergindo no processo aplicado (revestimento ao invés de jateamento).

As tensões compressivas causam desprendimento do revestimento quando excedem as forças que mantêm o revestimento aderido. Em grande parte dos casos, sua detecção é visual. Assim como em uma tira Almen, o revestimento com tensões residuais compressivas tende a se deformar no sentido do lado menos para o mais compressivo (figura 43), ou seja, no sentido de desprendimento do revestimento do substrato. Na indústria aeronáutica, define-se uma faixa de valores aceitáveis para essas tensões. (Hard Chrome Alternatives Team, 2004)

Figura 43 – Ilustração do teste de Almen

Adaptado de: (SAE HS-84, 2001)

Em todas as tiras Almen analisadas por (Gui, et al., 2012) foram observadas tensões compressivas e pelas figuras 44 e 45 (obtidas através de um estudo de DOE usando o Minitab) pode-se observar que os parâmetros que mais influem sobre as tensões residuais são a distância de aplicação, vazão de oxigênio e vazão de hidrogênio. A alimentação de pó por si só tem uma das menores influências sobre as tensões residuais.

Figura 44 – Gráfico de Pareto para os fatores que influenciam a tensão residual

Fonte: (Gui, et al., 2012)

Figura 45 – Efeitos médios dos parâmetros sobre a intensidade Almen

Fonte: (Gui, et al., 2012)

Os parâmetros do processo estão atrelados com a velocidade que as partículas de pó atingem a superfície, bem como com o tempo o qual ficam expostas a temperaturas que provocam transformações no revestimento. Conforme indicado na figura 45, o aumento das vazões de oxigênio e hidrogênio causa aumento de velocidade e temperatura, não exatamente na mesma proporção, e a distância está atrelada à perda de velocidade e tempo do pó sobre alta temperatura.

Resultados similares foram obtidos para o revestimento de WC-CrC-Ni em (Thiruvikraman, et al., 2014). Naquele trabalho, os parâmetros foram estudados para maximizar a adesão do revestimento e foi encontrada a seguinte ordem de influência: vazão de oxigênio, vazão de combustível, distância de aplicação, alimentação de pó e vazão do gás de transporte.

Para os estudos feitos tanto para a tensão residual como para a adesão existe um pico de máximo destes valores, o que quer dizer que qualquer variação fora do pico causa decréscimo em tensão residual e adesão.

A temperatura do substrato, ou indiretamente a taxa de resfriamento, afeta a tendência das tensões residuais no revestimento, conforme mostra a figura 46a. Nesta figura, uma maior temperatura do substrato, diminui a taxa de resfriamento do revestimento e, em consequência, aumenta as tensões residuais compressivas. (Selvadurai, et al., 2015)

Não há uma correlação direta entre dureza e tensões residuais apresentada no trabalho de (Selvadurai, et al., 2015). No entanto, observando-se o gráfico de distância de aplicação relacionado à dureza e tensão residual (figura 46b), pode-se ver uma tendência de aumento da tensão residual compressiva e diminuição da dureza. No mesmo trabalho, há gráficos apresentando velocidade de movimentação da pistola e passo, os quais apresentam tendências similares.

Figura 46 – Influência sobre a tensão residual: (a) Temperatura do substrato; (b) Distância de aplicação

Adaptado de: (Selvadurai, et al., 2015)

3.4.5 Dureza, porosidade e parâmetros de processo

Para entender as influências dos parâmetros de processo sobre a dureza e porosidade do revestimento (Murugan, et al., 2014) realizaram um estudo com diversos parâmetros com um sistema de aplicação a propano e um pó de granulação +15 -45 μm . Os estudos mostraram que a ordem de importância dos parâmetros para a dureza fica: vazão de oxigênio, vazão de combustível, alimentação de pó e distância de aplicação. A correlação entre os parâmetros do processo e a dureza depende da combinação de fatores, logo, não é possível dizer se a influência de cada parâmetro individual é diretamente ou inversamente proporcional.

Outro ponto importante do estudo de (Murugan, et al., 2014) é que para este processo existe uma correlação entre a dureza do revestimento e a porosidade, conforme ilustra a figura 47. Esta correlação pode ser entendida uma vez que durante a medição de dureza o revestimento sofre deformação e quanto mais porosidade maior a deformação, i.e. menor o valor de dureza.

Fonte: (Murugan, et al., 2014)

Para o estudo feito para porosidade e dureza existe um valor de mínimo e máximo respectivamente, o que quer dizer que qualquer variação fora das condições de mínima porosidade causa decréscimo em propriedades.

3.4.6 Remoção do WC-Co-Cr

No item 3.4.2 foi verificada a influência do processo de esmerilhamento sobre o revestimento, que também pode ser utilizado para remoção do WC-Co-Cr do substrato. No presente item serão descritos os métodos conhecidos para remoção do revestimento de uma peça, os quais são:

- Esmerilhamento/Lixamento/Retífica da superfície: utilizando-se abrasivos em lixa, esmeril e pontas montadas (nome comercial dado a partículas abrasivas com resina montadas sobre um eixo para uso em retífica rotativa) com dureza maior que o revestimento. Nestes casos, admite-se abrasivos de carboneto de silício, mas o recomendado é o uso de abrasivos diamantados (maior dureza). Quando parte do revestimento é removido, o processo de esmerilhamento agride o substrato causando perda de material do substrato, danificando a geometria da peça.
- Tratamento térmico da peça: em rotores tipo Pelton é feito um tratamento térmico do rotor até uma temperatura que ocasiona trincas e desprendimento devido os diferentes coeficientes de expansão térmica. Não se tem conhecimento de estudos do impacto desse tratamento sobre o material do substrato, e esse processo serve para remoção completa do revestimento.
- Remoção eletrolítica: ataque do cobalto presente no revestimento com posterior remoção dos grãos de WC.

O trabalho feito por (Menini, et al., 2004) mostra a remoção eletrolítica do WC-10Co-4Cr por diferentes soluções. O intuito foi de averiguar qual era a solução que possuía maior taxa de remoção. Ao observar as secções no microscópio eletrônico de varredura (MEV) pode-se ver que a solução ataca a matriz de forma irregular. Aparentemente, os grãos menores são removidos primeiro, devido à área de contato entre grão e matriz. Isso indica que o processo pode elevar a rugosidade superficial sem provocar maiores danos ao revestimento.

Ao mesmo tempo, podem ocorrer alguns pontos com sustentação mecânica menor no revestimento em regiões com acúmulo maior de grãos menores de WC, conforme

mostra figura 48. No entanto, vale lembrar que as partículas do pó do presente trabalho são de 10 a 38 μm e que o modelo de adesão prevê sustentação mecânica nas regiões convexas, conforme figura 30, acarretando que o espalhamento da partícula é maior que seu tamanho. Portanto, espera-se uma influência pequena das partículas menores de WC com baixa ancoragem.

Figura 48 – Secção por MEV do WC-10Co-4Cr tratado anodicamente

Fonte: (Menini, et al., 2004)

Dentre as soluções investigadas no trabalho de (Menini, et al., 2004), a que teve maior remoção foi a de cianeto de sódio. No entanto, esta solução pode ser perigosa se não utilizada corretamente.

Conforme observado no trabalho realizado por (Menini, et al., 2004) é importante a circulação da solução durante a remoção do revestimento para evitar passivação da superfície, e, em consequência, parada no processo de remoção. Também é importante notar que durante o processo de remoção eletrolítica há evolução competitiva com a formação de O_2 que ocorre mais em potenciais anódicos maiores e que ajuda na remoção do revestimento.

3.4.7 Modos de falha durante o processo e operação

Durante o processo do revestimento pode-se separar as possíveis falhas pelas seguintes etapas:

- Pré-aquecimento: uma baixa temperatura de pré-aquecimento ($T \ll 60^{\circ}\text{C}$, temperatura mínima utilizada no processo de revestimento do WC-10Co-4Cr) pode causar falha de adesão devido ao baixo espalhamento da partícula, conforme discutido anteriormente no item 3.3.2.1 e figura 32.
- Temperatura entre passes: o substrato e o revestimento possuem diferentes coeficientes de dilatação térmica, causando tensões na interface substrato-revestimento. Sendo assim, para evitar formação de trincas e desprendimentos, a temperatura máxima entre passes não deve ser excedida (130°C). Um exemplo de desprendimento causado por excesso de temperatura é ilustrado pela figura 49, a qual foi feita durante a aplicação do revestimento de WC-10Co-4Cr. O revestimento apresentou desprendimento do substrato e, por meio do material desprendido (figura 50), foi possível identificar uma coloração mais escura, atrelada à descarbonetação do WC. Adicionalmente foram identificados óxidos provindos do material do substrato, que indicam que a temperatura chegou a mais de 300°C , conforme ilustra a figura 51.

Figura 49 – Trinca causada por excesso de temperatura

Figura 50 – Material removido da trinca da figura 49

Figura 51 – Coloração x Temperaturas do aço inoxidável martensítico

Fonte: (Associação portuguesa de bushcraft, 2002)

- Preparação de superfície: conforme visto no item 3.3.2.1, através de (Lima, et al., 2007) e (Barr, et al., 2013), a adesão do revestimento resulta de processos físicos. Logo, a rugosidade do revestimento influi diretamente sobre a adesão. Trincas ou desprendimentos podem ser formados durante o processo devido à baixa rugosidade da superfície.
- Parâmetros de aplicação: os parâmetros de vazão e pressão dos gases influem na fusão das partículas de pó do revestimento e em sua velocidade de impacto. Logo, uma falha de parâmetros leva a baixa adesão entre camadas ou camada/substrato. Um exemplo de falha pode ser visto na figura 52, onde na região removida houve falta de oxigênio durante o primeiro passe de revestimento. O desprendimento ocorreu quando a espessura do revestimento estava próxima de 300 μm e sua extensão foi até o substrato.

Figura 52 – Remoção de trinca causada por falta de oxigênio no processo

Nem sempre as trincas são superficiais, conforme mostram as figuras 53 e 54, o que impede a detecção durante o processo produtivo. Em consequência, alguns defeitos podem aparecer durante a operação do rotor. Uma solução para esse tema foi proposta por (Fraunhofer-Institut für Werkstoff und Strahtechnik, 2015). Tal solução se baseia na medição do módulo de elasticidade do material que é alterada com o aparecimento de trincas ou falhas de adesão.

Figura 53 – Secção de um revestimento de Al_2O_3 com trincas laterais (parte superior é o revestimento e parte inferior o substrato)

Fonte: (Fraunhofer-Institut für Werkstoff und Strahtechnik, 2015)

Figura 54 – Secção de um revestimento de Cr_2O_3 com problemas de adesão (parte superior é o revestimento e parte inferior o substrato)

Fonte: (Fraunhofer-Institut für Werkstoff und Strahtechnik, 2015)

O acompanhamento do processo é vital para minimizar problemas no revestimento, bem como, identificar as causas das trincas, sem haver necessidade de seccionar o rotor.

Partindo-se da premissa que o revestimento foi executado corretamente durante sua aplicação, as falhas mais comuns que podem ocorrer durante a operação são: impactos mecânicos, que provocam trincas e até remoção localizada, e remoção precoce devido à cavitação.

3.4.8 Processo de reparo em revestimentos

O material do revestimento pode sofrer uma trinca ou desprendimento (figura 55) devido às razões acima, que após sua identificação deve ser removida conforme descrito no item 3.4.2.

De acordo com o que foi visto em (Murthy, et al., 2001) e (Masoumi, et al., 2014), e descrito no item 3.4.2, o esmerilhamento da superfície por materiais diamantados causa aumento das tensões residuais compressivas e melhora as propriedades mecânicas do material. Por essa razão, o processo de esmerilhamento localizado, se executado com os materiais corretos, não deve comprometer as propriedades do revestimento.

Figura 55 – Aparecimento de trincas visuais no revestimento

Após a remoção completa da trinca ou desprendimento que pode ser até o substrato (figura 56) ou meio do revestimento, aparecem duas interfaces, uma com revestimento (interface 1) e uma com substrato (interface 2).

Figura 56 – Remoção da trinca até o substrato

Para a interface 2 não há preparação especial, pois ao jatear o material do substrato se obtém a mesma rugosidade superficial de preparação para o revestimento.

O caso mais crítico vem da interface 1, que possui um material preparado para ser resistente à erosão, lembrando que o jateamento também é um processo de desgaste erosivo.

A preparação da superfície feita através de jateamento (com óxido de alumínio e rugosidade de $5.8 \mu\text{m}$ conforme (Wang, et al., 2005)), deve evitar aumento ou incidência de mais trincas no revestimento e proporcionar a rugosidade ideal ao substrato exposto. Para tanto, o jateamento deve ser realizado com um ângulo de

incidência em torno de 30° , pois, conforme visto no item 3.2.1, os mecanismos de remoção por fratura frágil ocorrem com maior incidência a 90° (maior taxa de desgaste) e a 30° a remoção ocorre maior remoção por deformação plástica ((Hutchings, 1992) e (Murthy, et al., 2001)).

Em seguida, as novas camadas de revestimento devem ser aplicadas respeitando uma espessura máxima de $500\ \mu\text{m}$. Na região da interface 1 deve se tomar mais cuidado, medindo-se sempre a espessura, até a região de reparo ser completa conforme ilustra a figura 57.

Figura 57 – Aplicação do revestimento sobre a área removida

Após a aplicação a região deve ser polida ou lixada para uniformização, conforme ilustra a figura 58.

Figura 58 – Polimento da região reparada

Para início dos testes, deverão ser levadas em conta, as seguintes premissas, que deverão ser verificadas durante a execução do trabalho:

- Os parâmetros de processo (vazão e pressão dos gases, distância de aplicação, alimentação de pó, velocidade de passe, temperatura de pré-aquecimento) já estão otimizados para aplicação, pois os mesmos foram baseados em parâmetros já existentes.
- A temperatura de pré-aquecimento tem papel fundamental na adesão do revestimento, conforme visto no item 3.3.2. Logo, o ponto de partida será a temperatura mínima de 60°C, podendo ser aumentada para realização do reparo.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 MATERIAL

4.1.1 Material do substrato

O material utilizado como substrato para os corpos de prova será o ASTM A743 CA6NM, que geralmente é fabricado para ensaios mecânicos em conjunto com as peças fundidas nas dimensões de 80 mm x 80 mm x 200 mm. A tabela 4 apresenta a composição química e algumas propriedades mecânicas nominais do material do substrato.

Tabela 4 – Composição química e propriedades mecânicas do ASTM A743 CA6NM (Silva, et al., 2007)

C %	Cr %	Fe %	Mn %	Mo %	P %	Si %	S %	σ_{esc} (MPa)	σ_{rup} (MPa)	A (%)	H (HB)
≤ 0.06	11.5 - 14	82.9- 88.1	$\leq$ 1.0	0.4 - 1.0	$\leq$ 0.04	$\leq$ 1.0	$\leq$ 0.03	$\geq$ 550	$\geq$ 755	$\geq$ 15	~ 280

4.1.2 Material do revestimento

O material utilizado para o revestimento é o WC-10Co-4Cr, vendido como pó sinterizado e aglomerado com granulação +10/-38 μm . Para caracterização, o pó foi misturado com baquelite e embutido, sendo a amostra polida e revestida com uma fina camada de ouro para visualização no microscópio eletrônico de varredura.

A figura 59 mostra a secção das partículas do pó visualizadas no MEV, onde é possível ver que seu tamanho é compatível à indicação realizada pelo fabricante, de possuir partículas maiores que 10 μm e menores que 38 μm .

Figura 59 – Imagem usando MEV do WC-10Co-4Cr utilizado

Um aumento maior das partículas do pó permite visualizar os componentes presentes de WC, Co e Cr. As partículas cerâmicas de WC apresentam tamanhos de 0.1 μm até 3 μm (figura 60a) e são indicadas na figura 60b pelos pontos 1 e 2. Também é importante notar que todas as partículas possuem arestas angulares e que há grande quantidade de partículas menores que 1 μm . Dependendo do processo utilizado, há transformação dessas partículas devido às altas temperaturas, conforme pode ser visto em (Bolelli, et al., 2015).

O cobalto possui mais concentração nos pontos 3 e 4 marcados na figura 60b, já o cromo está representado na figura 60b pelos pontos 5 e 6. Também é importante notar que há presença de Fe em todos os pontos em média de 0.38% em massa, conforme mostra a tabela 5.

Figura 60 – Imagem utilizando MEV do WC-10Co-4Cr: a - medição das partículas de WC. b - pontos onde foram realizadas análises por EDS.

Tabela 5 – EDS na partícula de pó

% em massa	Fe	Cr	Co	W
1	0.32	0.66	1.44	97.58
2	0.21	0.44	1.59	97.75
3	0.34	14.44	9.47	75.75
4	0.44	11.76	7.46	80.34
5	0.49	1.73	16.03	81.75
6	0.46	2.23	19.34	77.98

A aplicação do revestimento será por intermédio do processo de HVOF DJ 2600 (gás de combustão hidrogênio). A tabela 6 mostra as propriedades típicas do revestimento aspergido por intermédio do processo de HVOF com hidrogênio (DJ 2600).

Tabela 6 – Propriedades típicas do WC-10Co-4Cr (GTV Verschleiss-Schutz GmbH, 2012)

Espessura (µm)	Adesão (MPa) Conf. ASTM C633	Rugosidade (Ra- µm)	Dureza (HV)
300 (-100/+200)	>= 60	<= 6	>= 1100

4.2 MÉTODOS

O objetivo do trabalho relaciona-se ao reparo do WC-10Co-4Cr, tendo como avaliação o teste de erosão do revestimento. Para tanto além do teste de erosão é necessário entender o ocorrido durante o processo de desgaste para melhoria do processo de reparo.

Inicialmente, foi visto o modelo de erosão proposto por (Hutchings, 1992) para materiais dúcteis, e a propriedade mecânica relacionada com o desgaste erosivo em materiais dúcteis é dureza do material. Já para o caso de materiais frágeis (Hutchings, 1992), o desgaste erosivo é relacionado com tenacidade à fratura e dureza.

Esses dois modelos focam em materiais dúcteis e frágeis. No entanto, a composição do revestimento analisado nesse trabalho possui essas duas características, i.e. grãos frágeis com uma matriz dúctil. Para entender melhor quais características o trabalho deve ser baseado, analisaram-se os trabalhos de (Wheeler, et al., 2005), (Goyal, et al., 2012) e (Verdon, et al., 1997) que trabalharam com o revestimento de WC-10Co-4Cr por processo de HVOF com diferentes gases de combustão e que mostram um comportamento durante a remoção tendendo ao modelo dúctil.

Devido ao comportamento mais próximo do dúctil do revestimento de WC-10Co-4Cr, o ensaio de erosão foi realizado a 30°. Após o ensaio de erosão, o revestimento será caracterizado por microscopia, composição química e dureza. Desta forma, ao final objetiva-se compreender as diferenças entre um revestimento como aspergido e um que foi reparado.

4.2.1 Preparação dos corpos de prova

Os corpos de prova para ensaio de erosão (figura 61 e figura 62) possuem diâmetro de 20 mm com comprimento de 20 mm. Já os corpos de prova para adesão possuem diâmetro de 25 mm e comprimento de 65 mm (figura 61 e figura 63).

Figura 61 – Corpos de prova de erosão (esquerda) e adesão (direita)

Figura 62 – Dimensões do corpo de prova de erosão

Figura 63 – Dimensões do corpo de prova de adesão

4.2.1.1 Revestimento inicial dos corpos de prova

Para o revestimento dos corpos de prova foi utilizado o equipamento *Diamond Jet*, que possui: medidor de vazão da Sulzer Metco DJFW (figura 64), alimentador de pó a disco da Thermarch AT-1200 (figura 65) e pistola com *hardware* DJ 2600 (figura 66). Os parâmetros utilizados para a aplicação se encontram na tabela 7.

Tabela 7 – Parâmetros de aplicação do WC-10Co-4Cr

Temperatura de pré-aquecimento	60	°C
Pressão e vazão de H ₂	9.7/635	bar/NLPM
Pressão e vazão de O ₂	11.7/215	bar/NLPM
Pressão e vazão de ar comprimido	6.9/345	bar/NLPM
Vazão de N ₂	15	NLPM
Alimentação de pó	85	g/min
Distancia de aspersão	300	mm
Velocidade de manipulação robô (Movimento da pistola)	600	mm/s
NLPM – litros por minuto normalizados (<i>normal liters per minute</i>)		

Figura 64 – Medidor de vazão

Figura 65 – Alimentador de pó

Figura 66 – Pistola DJ 2600

Para manipulação da aplicação foi utilizado o robô HP 165-100 da Motoman, conforme mostra a figura 67.

Figura 67 – Robô para aplicação do revestimento

A preparação de superfície dos corpos de prova ocorreu por jateamento, no qual foi utilizado um equipamento portátil (pressão de trabalho de 7 bar, figura 68) e granalha de óxido de alumínio #24 como abrasivo (figura 69). A figura 70 ilustra o processo jateamento.

Figura 68 – Jato portátil

Figura 69 – Granalha de óxido de alumínio (#24) **Figura 70 – Jateamento dos corpos de prova**

Após o jateamento dos corpos de prova, o pré-aquecimento foi executado com um passe da chama da pistola sem alimentação de pó. Para os corpos de prova de erosão, a temperatura após um passe chegou a 110°C e os de adesão 100°C (medido com termômetro infravermelho *Fluke 59 Max*), o que gerou a necessidade de resfriamento para a aplicação do revestimento. As diferentes temperaturas se devem às dimensões das amostras. Os corpos de prova de erosão são menores que os de adesão, logo o cuidado no controle de temperatura deve ser maior para os corpos de erosão.

Para não exceder a temperatura após um passe, foi executado o resfriamento dos corpos de prova com ar comprimido incidindo em suas laterais, conforme ilustra a

figura 71. O resfriamento ocorreu até que a temperatura estivesse entre 50-60°C antes de uma nova aplicação.

Figura 71 – Resfriamento dos corpos de prova

Após cada passe a temperatura foi controlada com um termômetro infravermelho. Os corpos de prova de erosão chegaram a uma temperatura de até 130°C pós-passe e os corpos de prova de adesão chegaram a uma temperatura de até 100°C pós-passe.

Os corpos de prova foram caracterizados com relação à espessura de camada e à rugosidade superficial (Ra) após o término do revestimento. A espessura de camada foi medida por meio de um medidor de camada por medição magnética-indutiva e correntes parasitas modelo Fischer Dualscope MP0R (figura 72) e a rugosidade foi medida com um medidor digital da Mitutoyo SJ-210 (figura 73).

Figura 72 – Medidor de camada Fischer Dualscope MP0R

Figura 73 – Medidor de rugosidade Mitutoyo SJ 210

Durante essa etapa de caracterização, os corpos de prova foram separados em três grupos, denominados conforme tabelas 8, 9 e 10.

Tabela 8 – Grupos de corpos de prova

Grupo	Descrição	Indicação
Revestimento sem reparo	- O corpo de prova não sofre mais nenhum tratamento a partir deste ponto	A
Revestimento com reparo e preparado com remoção eletrolítica	- Em torno de 150 μm foram removidas por ponta montada, passando então para uma preparação de superfície por remoção eletrolítica e aplicação de outra camada de revestimento	B
Revestimento com reparo e preparado com jateamento	- Em torno de 150 μm foram removidas por ponta montada, passando então para uma preparação de superfície por jateamento e aplicação de outra camada de revestimento	C

Tabela 9 – Corpos de prova de erosão e seu grupo

Número (Erosão)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Grupo	C	C	B	C	B	B	B	A	A	A

Tabela 10 – Corpos de prova de adesão e seu grupo

Número (Adesão)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Grupo	C	C	C	A	A	B	A	C	B	B	B	A

Parte do revestimento foi removido com ponta montada e retífica plana (figura 74), processo esse executado antes dos tratamentos das superfícies, de modo a reproduzir a superfície durante um reparo de revestimento.

Figura 74 – Ponta montada para remoção do revestimento

4.2.1.2 Preparação dos corpos por eletropolimento (Grupo B)

O processo de remoção eletrolítica foi realizado com uma solução comercial (Desplac 1091: sulfato de sódio e carbonato de sódio) para remoção de níquel.

Para todos os corpos de prova utilizou-se 500 mL da mesma solução, preparada em água na proporção de 100 g/L.

Figura 75 – Solução eletrolítica

A remoção foi executada com a máquina de eletropolimento da Struers LectroPol-5, com a temperatura ajustada para 40°C e os seguintes parâmetros:

- Polimento: Tensão de 10 V, Vazão de 13 e tempo em 30s

- Ataque: Tensão de 6 V, Vazão de 10 e tempo de 60s.

O fabricante do equipamento de eletro polimento Struers LectroPol 5 não fornece as unidades de vazão para a solução eletrolítica e nem os artigos de aplicação do equipamento.

Figura 76 – Parâmetros da máquina de eletropolimento/ataque

Devido à máscara utilizada no equipamento, foram necessários alguns ajustes (aumento do furo) para executar o processo na medida de 20 mm e 25 mm de diâmetro. Logo, em uma primeira etapa foram executados os corpos de prova de erosão e em uma segunda etapa os de adesão.

Outro detalhe importante é que durante o primeiro teste pôde-se notar que o ataque não foi contínuo para os parâmetros iniciais. Sendo assim, a vazão da solução foi aumentada de 10 para 13 e o corpo de prova rotacionado durante os ciclos.

Figura 77 – Remoção no CP de erosão

Figura 78 – Remoção no CP de adesão

O número de ciclos foi definido pela rugosidade final atingida, a cada passo a rugosidade aumentava e o aspecto ficava como aspergido.

No corpo de prova 3 houve remoção completa do revestimento em quase metade de sua área. Já nos outros corpos de prova houve remoção completa em pequenas áreas da borda. Para o ensaio de erosão a remoção nas bordas não afetará os resultados uma vez que os testes são executados no centro da peça.

Os corpos de prova 5, 6 e 7, apresentaram marcas e coloração que podem ser sinais de oxidação e descarbonetação.

Figura 79 – Corpos de prova de erosão pós remoção eletrolítica

4.2.1.3 Preparação dos corpos por jateamento (Grupo C)

A etapa seguinte ao revestimento foi a remoção de parte do revestimento com ponta montada (figura 74) e com retífica rotativa reta.

Os corpos só foram jateados antes da aplicação de uma nova camada, e o material e equipamento de jato foram os mesmos utilizados e ilustrados pelas figuras 68 e 69.

4.2.1.4 Segundo revestimento para grupos B e C

As mudanças do primeiro para o segundo revestimento foram: o tratamento superficial empregado no revestimento e a taxa de alimentação de pó, que passou de 85 g/min para 65 g/min. A taxa de alimentação de pó foi alterada, pois em testes anteriores de reparo, a aplicação sobre a superfície jateada apresentava problemas de adesão durante o processo de revestimento com uma nova camada.

As temperaturas após passe e início de processo foram mantidas do mesmo modo que em 4.2.1.1.

Durante a aplicação, todos os corpos de prova feitos com remoção eletrolítica não apresentaram problemas. No entanto, os corpos com jateamento apresentaram trincas após o terceiro passe e quinto passe, conforme mostram as figuras 80 e 81, respectivamente. Como resultado final, somente o corpo de prova 1 de erosão, dentre todos os jateados, não apresentou problemas até o final do processo.

Para efeitos de teste, os corpos de prova do grupo C não foram considerados adiante devido à falha precoce durante seu revestimento, o que demonstra uma baixa adesão das novas camadas.

Figura 80 – Trincas e deslocamento no quinto passe

Figura 81 – Trincas e deslocamento no terceiro passe

4.2.2 Ensaio de desgaste erosivo

O ensaio de desgaste erosivo utilizou como abrasivo os sedimentos de um rio da Áustria (figura 82) que foram fracionados entre 250 a 355 μm . A análise dos minerais presentes foi executada pela ETH de Zurich, que triturou os grãos até 20 μm e analisou em um difratômetro de raios X (modelo Bruker AXS D8 Advance, $\text{CoK}\alpha$ com fenda divergente automática) na faixa de 2 a 80° 2 θ com uma largura de passo de 0.02° 2 θ e com um tempo de 4s por passo.

Figura 82 – Abrasivo retirado a jusante de um máquina Pelton

Para verificar a influência do fracionamento do material foi feita uma análise para partículas menores que 125 μm e outra para partículas de 500 a 1000 μm .

O material do substrato dos corpos de prova é o ASTM A743 CA6NM e possui uma dureza máxima de 280 HB, já o material do revestimento de WC-10Co-4Cr possui uma especificação mínima de dureza de 1100 HV. Considerando que o material irá sofrer desgaste erosivo significativo com uma dureza da partícula erosiva maior que a dureza do material erodido, e comparando as tabelas 11 e 12, tem-se que o substrato será mais afetado por minerais com dureza igual ou maior que 4 Mohs (quartzo, k-felspato, plagioclase, hornblenda, epidoto e magnetita) e o revestimento por minerais com dureza maior que 7 Mohs (somente o quartzo e epidoto).

Uma média ponderada das durezas considerando as porcentagens em massa presentes na tabela 11 e a equivalência de durezas presentes na tabela 12, permite chegar em uma dureza média de 1060 HV para sedimentos menores que 125 μm e uma dureza de 1030 HV para sedimentos entre 500 e 1000 μm . A diferença em porcentagem é de 2.7% o que é pequena em função da variação da granulação de sedimentos.

Outro modo de visualizar a diferença é a partir da soma das porcentagens dos minerais com dureza de 7 Mohs, onde é possível ver que houve uma variação de 2.2 pontos percentuais com a granulação, o que não é significativo se considerar a faixa de erro da análise.

Abrindo um pouco mais a comparação e considerando a soma das porcentagens dos minerais com dureza maior que 4 Mohs é possível ver que houve uma variação de 3.4 pontos percentuais com a granulação, o que não é significativo se considerar a faixa de erro da análise. Para fins de comparação a tabela 11 apresenta uma comparação de valores de dureza Mohs, Brinell e Vickers.

Tabela 11 – Análise dos componentes do abrasivo (% massa)

Fase	Dureza Mohs	<125 μm	500-1000 μm
Quartzo	7	34.5 +/- 0.8	35.8 +/- 0.5
K-Feldspato	6	4.8 +/- 0.7	3.5 +/- 0.5
Plagioclase	6	20.5 +/- 1.0	29.5 +/- 0.7
Mica 2	2-3	17.2 +/- 1.6	13.8 +/- 1.0
Clorito	ca. 2.5	7.8 +/- 1.0	6.8 +/- 0.6
Hornblenda	5.5-6	6.6 +/- 0.7	4.2 +/- 0.4
Calcita	3	1.5 +/- 0.2	2.2 +/- 0.3
Epidoto	6-7	7.4 +/- 0.7	3.9 +/- 0.4
Magnetita	5.5		0.3 +/- 0.1

Tabela 12 – Tabela comparativa de dureza (Cidra Precision)

Mohs (MM)	Brinell 10 mm (HB 500)	Vickers (HV)	Exemplo
1	--	27	Talco
2	--	61	Gipsita
2.5	90	102	-
3	136	157	Calcita
3.5	189	229	-
4	--	315	Fluorita
4.5	--	418	-
5	--	535	Apatita
5.5	--	669	-
6	--	817	Feldspato
6.5	--	982	-
7	--	1161	Quartzo
8	--	1567	Topázio
9	--	2035	Corundum
10	--	--	Diamante

O ensaio de erosão feito neste trabalho é similar ao encontrado em (Santa, et al., 2009), (Grewal, et al., 2012) e (Hadad, et al., 2007), e foi executado num equipamento conforme ilustra o esquema da figura 83 e montado no ângulo de 30°, conforme mostra a figura 84. Neste equipamento, o abrasivo é alimentado a uma taxa constante (através de um alimentador de pó para equipamentos de HVOF), a água é alimentada por uma bomba de alta pressão, a pressão de água é medida por um manômetro digital, e a mistura do fluído com sedimento é feita por um bico de máquina de corte com jato de água.

Figura 83 – Esquema do equipamento de testes de erosão

Figura 84 – Foto do posicionamento do corpo de prova

Para medir a velocidade de escoamento, foi utilizada como parâmetro a pressão de água e estabeleceu-se uma correlação de pressão em função da velocidade. Nos testes realizados foi adotada uma pressão de 50 bar, o que equivale a 71 m/s de velocidade de escoamento.

A duração deste teste de erosão não se baseia no tempo, mas sim na quantidade de abrasivo que passa pela peça. Assim sendo, para determinar a quantidade ideal de sedimentos durante o ensaio no revestimento dos corpos de prova, foi feito um teste até a erosão atingir o início do substrato. O valor final ficou em 300 g de sedimento.

O ângulo de incidência utilizado para os ensaios foi de 30°, pois, conforme visto nos itens 3.2.1 e 3.4.1, o comportamento do revestimento é mais dúctil do que frágil e a maior taxa de desgaste de materiais dúcteis está a 30°.

Outra razão para o uso do ângulo de 30° é que quanto menor o ângulo de impacto, maior a área erodida, o que facilita a visualização da interface do carboneto aplicado na primeira vez com o aplicado na segunda.

Antes de iniciar o ensaio de erosão é necessário eliminar possíveis fontes de erro na medição da massa. Para tanto, deve-se lembrar de dois pontos importantes: o revestimento é poroso e o furo roscado pode acumular água ou até mesmo sedimentos. Para evitar erros de medição, a rosca do corpo de prova foi removida, as amostras lavadas com sabão, secadas com ar comprimido e colocadas em uma estufa (figura 85) a 60°C por 5 min.

Figura 85 – Estufa para secagem dos corpos de prova

Após a secagem completa dos corpos de prova de erosão, foi feita a medição de massa utilizando a balança de precisão Kern ALJ 220-4 (figura 86). O processo de secagem foi executado em todos os corpos de prova antes de cada medição de massa, para a condição sem erosão e pós ensaio de erosão.

Figura 86 – Balança de precisão

4.2.3 Ensaio de adesão

Inicialmente, os corpos de prova para ensaio de adesão (brevemente descrito no item 3.4.2) foram limpos com acetona e os contra corpos foram jateados. Na sequência foram colocados em uma estufa a 60°C para remoção da umidade conforme ilustra a figura 87.

Figura 87 – Pré-aquecimento para eliminar umidade dos corpos de prova

A cola utilizada no processo foi a EP 15 da Masterbond, que possui valor de adesão especificado de 12000 psi (82.7 MPa). A cola foi aplicada no corpo de prova e contra corpo, sendo o conjunto colocado em um dispositivo para garantir o alinhamento e contato conforme ilustra a figura 88.

A temperatura da estufa foi regulada para 160°C e os corpos foram deixados por 2h para cura.

Figura 88 – Dispositivo para alinhamento e cura dos corpos de prova

Os ensaios de adesão foram executados em uma máquina de ensaio de tração para 120 t com controle de avanço por tensão (11 MPa/s para uma secção de diâmetro de 25.4 mm).

O resultado é medido pela força de ruptura dividida pela área do corpo de prova, resultando no valor de adesão.

Figura 89 – Máquina de ensaio de tração utilizada no ensaio

4.2.4 Caracterização dos corpos de prova

4.2.4.1 Microscopia de varredura eletrônica

Com o objetivo de verificar os mecanismos de desgaste após o ensaio de erosão, os corpos de prova 3, 5, 6, 7, 9 e 10 foram analisados com o auxílio do microscópio eletrônico de varredura com EDS integrado modelo JEOL JSM-6010LA (figura 90).

Figura 90 – MEV JEOL JSM-6010LA

Os corpos de prova 3, 5 e 7 (grupo B) foram visualizados em seu topo para verificação do seu desgaste. Para complementar a caracterização, foi executado o seccionamento e polimento dos corpos de prova 6 e 7.

O mesmo processo foi executado para o corpo de prova 10, que foi caracterizado em seu topo, e com corpo de prova 9, seccionado e polido para complemento da caracterização.

O corpo de prova de adesão 9 foi visualizado devido à interface entre camadas e também para verificar a composição química superficial.

4.2.4.2 Medição de dureza micro e nano

A aplicação de revestimento nos corpos de prova do grupo B teve uma redução na taxa de alimentação de pó em relação ao grupo A e por essa razão foram executadas medições de micro dureza nas camadas. O ensaio de medição foi executado por um micro-durômetro Vickers modelo Buehler série 1600, conforme figura 91. A carga utilizada para medição foi de 300 g (Bolelli, et al., 2015), a qual é comumente utilizada pela literatura nesse tipo de revestimento.

A medição de dureza foi executada nos corpos de prova de erosão 6 e 9. Em especial, no corpo de prova 6 foram tomadas medidas da primeira e segunda camada de revestimento.

Figura 91 – Micro durômetro Buehler

Como forma adicional de caracterização, realizaram-se medidas de nanodureza com o equipamento TI 950 TriboIndenter da Hysitron (figura 92). A medição é feita por intermédio da medição de força e de deslocamento da ponta diamantada. Com base na curva de carregamento e descarregamento calcula-se a nanodureza por meio do método de (Oliver, et al., 1992).

Figura 92 – Medição de nano dureza

A medição de nanodureza foi executada no seccionamento de partículas de pó do revestimento de WC-10Co-4Cr, nas quais devem ser encontradas partículas de WC, Co e Cr separadas. Após o revestimento utilizando o pó, foram executadas medições nos corpos de prova 7 e 9. Nesta condição foram executadas medições nas partículas de WC e na interface entre as partículas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Aplicação do processo

As tabelas 13 e 14 apresentam os valores de espessura e rugosidade para cada corpo de prova. Os valores de rugosidade dos corpos de adesão ($5.6\text{--}8\mu\text{m}$) foram um pouco maiores que os apresentados nos corpos de erosão ($5.3\text{--}6.5\mu\text{m}$).

A única variável de aplicação que difere esses corpos de prova é o gradiente de temperaturas durante a aplicação do processo, pois como os corpos de prova de erosão possuem menor massa que os de adesão, a temperatura se eleva mais rápido.

Conforme o que foi visto na figura 32 (item 3.3.2.1), quanto maior a temperatura de pré-aquecimento melhor o espalhamento da partícula de pó. Assim sendo, talvez as partículas tenham se espalhado melhor nos corpos de prova de erosão, reduzindo assim sua rugosidade.

Tabela 13 – Espessura e rugosidade após revestimento (corpo de prova de erosão)

Número	Grupo	Após revestimento		
		Espessura		Rugosidade
		Min (μm)	Máx (μm)	Ra (μm)
1	C	241	340	5.89
2	C	233	320	5.247
3	B	249	340	5.488
4	C	276	303	5.861
5	B	230	325	5.48
6	B	255	292	5.69
7	B	253	351	5.789
8	A	274	320	6.492
9	A	289	331	6.198
10	A	226	346	6.458

Tabela 14 – Rugosidade e espessura após primeiro revestimento (corpo de prova de adesão)

Número	Grupo	Após revestimento		
		Espessura		Rugosidade
		Min (μm)	Máx (μm)	Ra (μm)
1	C	252	359	7.624
2	C	227	368	6.525
3	C	275	380	5.783
4	A	264	386	5.752
5	A	266	403	5.646
6	B	280	396	5.813
7	A	229	356	5.904
8	C	268	360	6.267
9	B	273	358	6.685
10	B	284	364	7.214
11	B	256	370	7.988
12	A	280	410	7.659

Durante a remoção de parte do revestimento com ponta montada, constatou-se que o processo com retífica rotativa e ponta montada faz com que a rugosidade do revestimento diminua de 5.2-8.0 μm para 1.1-2.8 μm, conforme mostram as tabelas 13 e 15 para o corpo de erosão, e tabelas 14 e 16 para o corpo de adesão.

Tabela 15 – Espessura e rugosidade após retífica (corpo de prova de erosão)

Número	Grupo	Espessura		Rugosidade
		Min (μm)	Máx (μm)	Ra (μm)
3	B	113	157	1.381
5	B	104	142	1.087
6	B	132	168	1.383
7	B	131	177	1.723
1	C	69	192	2.092
2	C	67	155	1.503
4	C	131	165	1.132

Tabela 16 – Rugosidade e espessura após retífica (corpo de prova de adesão)

Número	Grupo	Espessura		Rugosidade
		Min (μm)	Máx (μm)	Ra (μm)
6	B	136	175	2.811
9	B	145	163	1.231
10	B	136	152	2.19
11	B	116	157	1.536
1	C	105	151	2.194
2	C	89	176	1.918
3	C	123	159	1.473
8	C	59	153	3.01

Como a adesão do revestimento depende de 70 a 80% da interação física com o substrato (item 3.3.2.1), a rugosidade é essencial para garantir uma boa adesão. Em (Lima, et al., 2007) se comenta que para revestimentos de espessuras maiores que 300 μm, a rugosidade deve ser 1/3 do tamanho da partícula. Como o pó possui granulação +10/-38 μm, o substrato deve ter uma rugosidade superficial de 8 μm Ra. Entretanto, em (Wang, et al., 2015) foram obtidos valores de adesão maiores que 70 MPa para rugosidades maiores que 5.8 μm Ra.

Os processos de preparação de superfície devem aumentar a rugosidade superficial do revestimento para aplicação de uma nova camada.

5.1.1 Tratamento superficial por remoção eletrolítica

A remoção eletrolítica foi usada como um modo de aumentar a rugosidade superficial, conforme descrito brevemente em 3.4.6, mas antes do início do processo a superfície foi polida até chegar às rugosidades e espessuras apresentadas nas tabelas 17 e 18.

Tabela 17 – Espessura e rugosidade após polimento (corpo de prova de erosão)

Número	Grupo	Espessura		Rugosidade
		Min (μm)	Máx (μm)	Ra (μm)
3	B			
5	B	64	94	1.494
6	B	48	53	1.259
7	B	9.4	48	1.483

Tabela 18 – Rugosidade e espessura após polimento (corpo de prova de adesão)

Número	Grupo	Espessura		Rugosidade
		Min (μm)	Máx (μm)	Ra (μm)
6	B	61	110	0.058
9	B	102	130	0.134
10	B	37	119	0.082
11	B	27	67	0.062

Após o ataque eletrolítico foi constatado que a rugosidade de 0.1-1.5 μm aumenta para 3.6-6.4 μm, conforme mostram as tabelas 19 e 20. Esses valores estão próximos da rugosidade do revestimento aspergido. Em especial, para os corpos de prova de erosão, esses valores são maiores do que 5.8 μm (tabelas 13 e 14).

Tabela 19 – Espessura e rugosidade após remoção eletrolítica (corpo de prova de erosão)

Número	Grupo	Espessura		Rugosidade
		Min (μm)	Máx (μm)	Ra (μm)
3	B			
5	B	17	32	6.022
6	B	35	104	6.416
7	B	39	56	6.256

Tabela 20 – Espessura e rugosidade após remoção eletrolítica (corpo de prova de adesão)

Número	Grupo	Espessura		Rugosidade
		Min (μm)	Máx (μm)	Ra (μm)
6	B	82	129	5.726
9	B	0	75	3.632
10	B	22	68	5.042
11	B	82	129	5.726

5.1.2 Tratamento superficial por jateamento

Após o jateamento dos corpos de prova, foi constatado que não há aumento significativo da rugosidade sobre um revestimento de WC-10Co-4Cr. A faixa de rugosidade após retífica era de 1.1-2.2 μm e foi alterada para a faixa de 1.8-2.4 μm, conforme mostram as tabelas 21 e 22.

Tabela 21 – Rugosidade após jateamento (corpo de prova de erosão)

		Rugosidade
Número	Grupo	Ra (μm)
1	C	2.148
2	C	2.261
4	C	1.891

Tabela 22 – Rugosidade após jateamento (corpo de prova de adesão)

		Rugosidade
Número	Grupo	Ra (μm)
1	C	2.24
2	C	2.38
3	C	1.778
8	C	2.404

Os valores de rugosidade após jateamento explicam os desprendimentos ocorridos durante o processo de revestimento, conforme ilustram as figuras 80 e 81. A rugosidade após jateamento é muito menor que $5.8 \mu\text{m}$ e muito menor que a rugosidade do revestimento aspergido, o que não permite ancoragem suficiente para o processo de revestimento. Uma comparação entre processos e o parâmetro de rugosidade é feita na figura 93, onde na figura 93a não houve trinca e deslocamento durante o processo de revestimento e na figura 93b houve.

Figura 93 – Comparação da rugosidade por tratamento superficial: (a) eletropolimento; (b) jateamento

5.2 Ensaios de adesão

A tabela 23 mostra os valores finais de espessura encontrados no revestimento dos corpos de prova de adesão.

Tabela 23 – Espessura após revestimento (corpo de prova de adesão)

Número	Grupo	Espessura	
		Min (μm)	Máx (μm)
1	C	219	313
2	C	267	333
3	C	282	297
4	A	264	386
5	A	266	403
6	B	252	320
7	A	229	356
8	C	99	323
9	B	269	334
10	B	210	310
11	B	278	324
12	A	280	410

Os ensaios de adesão não apresentaram valores quantitativos conclusivos. Conforme mostra a tabela 24, os corpos de prova do grupo A (revestimento sem reparo) romperam na cola com valores diferentes, o que indica que não houve uniformidade no processo de cura.

Outros fatores que contribuíram para a não repetibilidade na realização do teste são: velocidade de avanço, que deve ser na faixa de 0.013-0.021 mm/s, e o não uso do dispositivo de auto alinhamento. Conforme recomendado pela norma (ASTM C633-01, 2013) não há necessidade, se a máquina possui auto alinhamento.

Tabela 24 – Resultados do ensaio de adesão

Corpo de prova	Grupo	Valor de tensão (MPa)	Porcentagem de falha do revestimento (%)
4	A	44	0
7	A	12.6	0
12	A	26	18.3
9	B	18	41.2
10	B	33	41.9
11	B	19	84.8

De qualquer forma, os resultados podem ser vistos como qualitativos, uma vez que o rompimento dos corpos de prova do grupo A ocorreu preponderantemente na cola e chegou a valores de 44 MPa, o que indica que a adesão deve ser maior que os valores apresentados. Já os corpos de prova do grupo B apresentaram uma falha coesiva em 41.2-84.8% do corpo de prova e uma falha na cola no restante, apresentando valores de 18-33 MPa. Logo, qualitativamente, a adesão dos corpos de prova do grupo B é menor que as do grupo A.

Uma preparação conforme grupo B deve ser evitada em regiões críticas de desgaste erosivo e também regiões que sofram impactos a 90°, pois regiões com menor adesão podem ser afetadas se submetidas a esforços normais (os quais possuem seu valor máximo com impactos a 90°) e através de uma falha adesiva, originar delaminações. Desta forma, o desgaste em regiões de menor adesão, seja menor e, por consequência, resultará em um desgaste mais uniforme. Levando em consideração o citado, para o caso de rotores Pelton, a preparação conforme grupo B em regiões de entrada e fundo da concha devem ser evitadas.

Figura 94 – Ensaio de adesão CP 09 (Grupo B) **Figura 95 – Ensaio de adesão CP 10 (Grupo B)** **Figura 96 – Ensaio de adesão CP 11 (Grupo B)** **Figura 97 – Ensaio de adesão CP 04 (Grupo A)**

Figura 98 – Ensaio de adesão CP 07 (Grupo A)

Figura 99 – Ensaio de adesão CP 12 (Grupo A)

5.3 Medição de dureza sobre o revestimento

Para medição de dureza foi utilizado um aparelho de microdureza Vickers com uma carga de 300 g.

Como base foram seccionados os corpos de prova utilizados no ensaio de erosão CP 6 (representando o grupo B) e CP 9 (representando o grupo A).

A observação do seccionamento do CP06 (figura 100) mostra uma linha de separação condizente com a espessura medida na primeira camada (35-104 μm), conforme tabela 19. A medição de dureza na primeira camada não é confiável, devido à formação de trincas durante o processo, conforme mostra a figura 101, em locais próximos à linha azul.

Figura 100 – Medição de dureza CP06 **Figura 101 – Medição de dureza na primeira camada CP06**

A observação do seccionamento do CP9 durante o ensaio de dureza (figura 102), não mostra nenhuma linha de separação entre passes.

Figura 102 – Medição de dureza CP09

A medição de dureza dos dois corpos de prova demonstra em média uma maior dureza para o revestimento feito no grupo A com uma taxa de alimentação de pó de 85 g/min se comparada com a segunda camada no grupo B feita com 65 g/min. No entanto, considerando o desvio padrão, não há diferença estatisticamente significativa entre as medições. Portanto, não se pode afirmar que a diferença na alimentação de pó causará uma diferença significativa na dureza e em consequência na taxa de desgaste durante os ensaios do corpo de prova.

Figura 103 – Valores de dureza encontrados

A medição de nano-dureza do pó utilizado no revestimento resultou em três medições distintas, nos valores médios de 1.53 GPa, 2.79 GPa e 23.13 GPa conforme mostra a figura 104.

Os valores de dureza para o cromo e cobalto são de 90 HV e 230 HV, o que equivale a 0.9 e 2.3 GPa aproximadamente. (Ross, 1992)

Apesar de os valores de nanodureza instrumentada não poderem ser correlacionados diretamente com os valores de dureza Vickers, é possível verificar que as medições realizadas na partícula de pó estão na mesma ordem de grandeza das durezas do cobalto e cromo puros.

Os valores de dureza encontrados, conforme figura 105, para as partículas de WC estão na ordem de grandeza de 2200 HV ou 21.6 GPa encontradas em (Bauccio, 1994).

Apesar de a média para o corpo de prova 9 para micro-dureza ser maior que a do corpo de prova 6 (o qual foi revestido em conjunto com o corpo de prova 7), ao medir a nano-dureza da interface não foi encontrada diferença estatisticamente significativa entre a segunda camada do corpo de prova 7 e o 9.

Figura 105 – Comparação de nano-dureza nos corpos de prova

5.4 Ensaio de erosão

A tabela 25 mostra as espessuras finais encontradas nos corpos de prova para ensaio de erosão.

Tabela 25 – Espessura após revestimento (corpo de prova de erosão)

Número	Grupo	Espessura	
		Min (μm)	Máx (μm)
3	B	217	271
5	B	196	340
6	B	220	329
7	B	302	341
8	A	274	320
9	A	289	331
10	A	226	346

Os ensaios de erosão mostram que o corpo de prova na condição A tem o menor desgaste erosivo, apresentando, para 300 g de abrasivo, uma média de 38.03 mg de desgaste, conforme mostra a tabela 26. Pela observação das bordas do revestimento, conforme mostram as figuras 106, 107 e 108, há uma transição suave do revestimento para o substrato.

O corpo de prova 8 não apresentou nenhuma erosão do substrato, enquanto os corpos de prova 9 e 10 apresentaram um pequeno desgaste erosivo no substrato. Lembrando que o desvio padrão dos resultados foi 1.2 mg, que é 3.2% da média dos resultados, pode-se dizer que a erosão do substrato não alterou significativamente os resultados.

Tabela 26 – Ensaio do grupo A

Número	Condição	Média (μm)	Massa Inicial (g)	Massa Final (g)	Desgaste (mg)
8	A	297	46.8455	46.8088	36.7
9	A	310	47.4287	47.3901	38.6
10	A	286	46.9424	46.9036	38.8
	Media	298		Media	38.0
	Desvio	12		Desvio	1.2

Figura 106 – Imagem por microscópio ótico do CP08 (após 300g de abrasivo)

Figura 107 – Imagem por microscópio ótico do CP 09 (após 300g de abrasivo)

Figura 108 – Imagem por microscópio ótico do CP10 (após 300g de abrasivo)

O ensaio do grupo B apresentou uma remoção de massa 22% maior que o grupo A, com um desgaste de 46.4 mg em média, conforme mostra a tabela 27. Pela observação das imagens das figuras 109, 110, 111 e 112, pode-se observar pela microscopia ótica que somente no CP03 apareceu uma diferença na interface do revestimento antigo para a nova camada. Esta diferença por ser identificada por meio de um degrau, o que pode indicar uma delaminação. No entanto, para os

outros CPs desse grupo esse tipo de degrau não foi observado por microscopia ótica.

Tabela 27 – Ensaio do grupo B

Número	Condição	Média (μm)	Massa Inicial (g)	Massa Final (g)	Desgaste (mg)
3	B	244	47.5442	47.4971	47.1
5	B	268	47.7493	47.7016	47.7
6	B	274.5	47.433	47.3906	42.4
7	B	321.5	47.4491	47.4008	48.3
	Média	277		Média	46.4
	Desvio	32		Desvio	2.7

Figura 109 – Imagem por microscópio ótico do CP03 (após 300g de abrasivo)

Figura 110 – Imagem por microscópio ótico do CP05 (após 300g de abrasivo)

Figura 111 – Imagem por microscópio óptico do CP06 (após 300g de abrasivo)

Figura 112 – Imagem por microscópio óptico do CP07 (após 300g de abrasivo)

De modo a compreender a influência do material base erodido sobre os resultados do grupo B, foi necessário fazer a digitalização da superfície do corpo de prova 3 para verificar o volume de revestimento e material base removidos. A caracterização de volume ocorreu com o braço de medição 3D Faro Edge com ScanArm HD para digitalização da superfície (figura 113a) e o software NX 10.0 para reconstrução da superfície (figura 113b) e cálculo de volume.

Figura 113 – Superfície digitalizada do CP3 em 3D (a) e superfície reconstituída (b)

A determinação do volume removido do material base ocorreu pela definição de um plano paralelo e abaixo da superfície, a uma distância da superfície igual à média da espessura do revestimento. A partir da intersecção com a superfície foi definindo o volume de material base erodido e, na sequência, o volume de revestimento erodido. Calculou-se um volume de material base erodido de 0.78 mm^3 e um volume de revestimento erodido de 2.49 mm^3 . Utilizando uma densidade de 7700 kg/m^3 , estes dados resultam em uma massa de ASTM A743 CA6NM de 6.0 mg.

Um outro método para medida de volume erodido baseou-se em algumas secções obtidas através de microscopia confocal, onde foram obtidas 5 secções até o meio da área erodida. A figura 114a representa uma delas. Estas secções foram comparadas com a vista de topo (figura 114b) e aproximadas e extrapoladas utilizando software de CAD Solid Edge ST10 (figura 114c). O volume erodido do material base medido dessa forma foi de 0.758 mm^3 , que representa 5.84 mg, o que, comparado com o valor obtido pela digitalização resulta em uma diferença de 2.74%.

Utilizando o CP3 como base, tem-se 6 mg removidos de ASTM A743 CA6NM (12.7% da massa total) e 41.1 mg (87.3% da massa total) de revestimento removidos. Vale salientar que, em especial para o revestimento de WC-10Co-4Cr, não foi realizada uma comparação direta de volume com massa pois o revestimento não possui um valor de densidade padrão, ou seja, a densidade depende da quantidade de seus componentes e porosidades, que variam conforme o processo de aplicação (Bolelli, et al., 2015).

Figura 114 – Estimativa da massa de material base erodida baseada em microscopia com focal

O efeito da erosão do material base sobre os resultados encontrados pode ser melhor visualizado com uma comparação de taxa média de erosão em mg/g, conforme mostram as tabelas 28 e 29. Para os cálculos de taxa média não foi considerada nesse ponto a influência da erosão do material base.

Tabela 28 - Taxa média de erosão para grupo B

Número	Condição	Média (mg/g)
3	B	0.157
5	B	0.159
6	B	0.141
7	B	0.161
	Média	0.154
	Desvio	0.008

Tabela 29 - Taxa média de erosão para grupo A

Número	Condição	Média (mg/g)
8	A	0.122
9	A	0.128
10	A	0.129
	Média	0.126
	Desvio	0.003

Os corpos de prova do grupo B tem uma taxa média de erosão maior que o grupo A. No entanto, a influência da massa do material base não fica clara sem estimar a quantidade de abrasivo que foi utilizada para o desgaste de cada material.

O modelo de desgaste empírico de (Oka, et al., 2005) permite o cálculo da taxa de erosão de aços dúcteis em desgaste erosivo com propulsão a ar comprimido. No entanto, requer uma medição da dureza do material e também o cálculo dos coeficientes a e b . Para facilitar a comparação, foram utilizados dois aços inoxidáveis martensíticos como referência S3 e S4 do artigo, onde somente são reveladas suas durezas e medições de a e b .

A taxa de desgaste foi estimada utilizando as condições de velocidade, tamanho de partícula, ângulo do ensaio feito com os corpos de prova (CP1-10) e dureza máxima do material base de 280 HB, mais as condições de referência do artigo para o SiO_2 (uma vez que a dureza média dos sedimentos está próxima da dureza do quartzo) como material erodente e S3 como referência. O resultado foi uma taxa de desgaste de 0.310 mg/g. Já o resultado utilizando as mesmas condições, mas utilizando o S4 como referência foi de 0.389 mg/g. Portanto, espera-se que a taxa de erosão média do material base (ASTM A743 CA6NM) esteja próxima dessa faixa.

A taxa de desgaste do ASTM A743 CA6NM pode ser visualizada no trabalho publicado por (Hamilton, et al., 2017), onde foram utilizadas as seguintes condições de desgaste: material erodente sendo alumina de tamanho 50 μm , velocidade de impacto 70 m/s, ângulo de impacto de 30° e propulsão a ar comprimido. Com essas condições, (Hamilton, et al., 2017) encontrou uma taxa média de erosão de 0.383 mg/g.

O valor estimado para o S4 é similar ao valor encontrado para o ASTM A743 CA6NM. No entanto, deve-se levar em conta que a propulsão utilizada para os ensaios dos corpos de prova CP1-10 foi em meio aquoso, o que, devido aos efeitos de escoamento, pode acarretar taxas de desgaste diferentes conforme pode ser visto em (Hawthorne, et al., 1999). De qualquer forma, utilizando como referência o valor de taxa calculado de 0.389 mg/g (mg removidos por grama de sedimentos) e o

valor de massa removida de 6 mg, tem-se que foram utilizados 15.4 g de sedimentos.

Com base na estimativa de sedimentos utilizados no desgaste do material base é possível estimar a quantidade de sedimentos utilizados no desgaste do revestimento ($300 - 15.4 = 284.6$ g). Para a correção do valor de taxa de erosão tem-se a quantidade de sedimentos e a massa de revestimento removida de 41.1 mg e, por consequência, um valor médio de desgaste de 0.144 mg/g, que é menor que a taxa previamente encontrada. Apesar de aproximar o resultado do grupo B com o grupo A (de 23.9% de diferença para 14 %), tal comparação demonstra que a taxa de desgaste do grupo B ainda é maior que a do grupo A (0.127 mg/g).

Já no corpo de prova 7 havia uma camada média maior de WC-10Co-4Cr, conforme mostra a tabela 27, o que explica uma menor remoção do substrato durante o desgaste erosivo. Já a maior remoção de material poderia ser explicada por duas razões: escoamento da água diferente, ocasionando diferentes impactos dos sedimentos no corpo de prova 7 se comparado aos outros devido a desgaste do substrato (corpos de prova 3, 5 e 6), somado à remoção de WC-10Co-4Cr que possui maior densidade que o substrato e a presença de regiões maiores com delaminações nesse corpo de prova. Em média a diferença de desgaste ficaria entre 23.9% e 14% comparando o grupo A com o grupo B.

Para a taxa de erosão do WC-10Co-4Cr tem-se como comparação o valor do artigo de (Hamilton, et al., 2017), que foi de 0.104 mg/g. A conversão de volume removido para massa removida considerou o valor de densidade encontrado para o revestimento de WC-10Co-4Cr utilizando o equipamento Uniquecoat M3 e pó H.C. Starck Amperit 556.059 em (Bolelli, et al., 2015), que é o mesmo equipamento e pó utilizado no trabalho de (Hamilton, et al., 2017). O valor de taxa média de erosão para o revestimento é da mesma ordem de grandeza do valor encontrado nos corpos de prova do grupo A. Outro ponto importante é a observação do trabalho realizado por (Bolelli, et al., 2015), onde as taxas de desgaste abrasivo para o processo de HVOF com tamanho de pó -30/+5 μm é menor que para os processos de HVOF com querosene (JP5000) e propano (DJ2700). Ou seja, os resultados encontrados vão ao encontro da mesma conclusão, onde o processo com HVOF e

pó -30/+5 μm possui uma taxa menor de desgaste que o processo a hidrogênio (DJ2600) com pó -38/+10 μm .

Devido à falha precoce do revestimento do grupo C, somente o grupo B restou para comparação. Até esse ponto foi visto que o grupo B demonstra maior taxa de desgaste que o grupo A. Dessa forma para qualquer conclusão é necessário compreender a diferença que causou um maior desgaste no grupo B. Como hipóteses podem ser levantadas:

- Mudança na alimentação de pó: partindo do princípio que a alimentação de pó com 85 g/min está no parâmetro ótimo, qualquer mudança faria com que as propriedades do revestimento (diminuição de dureza e aumento de porosidades) se reduzissem, aumentando o desgaste conforme discutido nos itens 3.2.1 e 3.4.5.
- Contaminação do revestimento: os estudos realizados por (Barr, et al., 2013) analisaram a adesão revestimento/substrato, e não de revestimento para revestimento. Esta alternativa considera a hipótese de contaminação que, mesmo com o pré-aquecimento utilizando a chama da pistola, pode não ter sido removida e ocasionou uma pequena queda na adesão entre camadas. Ou ainda, houve formação de uma camada de óxido devido ao processo de remoção eletrolítica. A figura 109 mostra uma interface de carboneto para carboneto (linha azul), que pode ter sido gerada por contaminação e diferença de adesão.
- Processo de preparação eletrolítico: os picos gerados pelo processo de remoção eletrolítica não apresentam ancoragem suficiente, devido à remoção do cobalto da matriz. Ou então, houve formação de camada de óxido, que causou uma menor adesão devido ao baixo espalhamento da partícula do revestimento, conforme pode ser visto no item 3.3.1.1.

5.5 Análise por microscopia eletrônica de varredura

Com o intuito de tornar alguns termos utilizados mais claros, durante o texto foram utilizadas duas palavras: deslocamento (desprendimento visível sem microscópio durante o processo de aplicação ou desgaste) e delaminação (desprendimento localizado entre camadas visível somente no microscópio).

5.5.1 Corpos de prova do grupo A

A observação do corpo de prova 10 mostra delaminação próxima à interface entre o revestimento e o material base em uma região de aproximadamente 30 μm , conforme mostra a figura 115. Na região do material base há marcas de desgaste compatíveis com erosão em materiais dúcteis e com impacto a ângulos menores que 90°.

Também é possível observar alguns pontos condizentes com remoção de partículas de carboneto, similares às encontradas na figura 36 (Santa, et al., 2009).

Figura 115 – Vista de topo do CP10

O seccionamento do CP09 mostra que a perda de material foi uniforme na região onde ocorreu o desgaste. Observou-se, apenas, uma trinca iniciando no topo do revestimento e terminando no material base, conforme mostra a figura 116b.

Para análise da composição química em massa, foi realizado EDS no revestimento conforme indicado na figura 116b. Na tabela 30 é possível ver que os valores encontram-se próximos do esperado para o WC-10Co-4Cr.

Figura 116 – Seccionamento do CP09

Tabela 30 – Composição química por EDS no revestimento do CP9

% em massa	O	S	Cr	Co	W
1	0.49	0.20	2.10	7.55	89.66
2	0.33		4.21	13.48	81.97
3	0.43	0.16	4.80	14.07	80.53
4	0.56	0.21	6.56	15.34	77.32
Média	0.45	0.19	4.42	12.61	82.37

5.5.2 Corpos de prova do grupo B

O corpo de prova 3 mostra delaminação entre camadas a aproximadamente 200 µm da interface entre o revestimento e material base, conforme mostra a linha em azul na figura 117. Tal delaminação pode ser a causa da maior taxa de desgaste encontrada nos corpos de prova do grupo B.

O desgaste no material base é similar ao encontrado no corpo de prova 9.

Figura 117 – MEV do topo do CP03

Um detalhe maior pode ser visto na figura 118, onde abaixo da linha em azul é mais difícil a visualização dos grãos de WC, bem como a visualização de depressões, devido aos inúmeros impactos sofridos durante o desgaste erosivo. Na parte superior da figura 118 e acima da linha azul é possível ver uma maior exposição de grãos de carboneto, onde as regiões com aparência mais lisa sofreram impactos sucessivos e as regiões com aparência mais rugosa sofreram delaminação. O EDS (tabela 31) nos pontos 1 e 2 mostra uma média de porcentagem em massa de oxigênio de 12.6% e os pontos 3 e 4 uma média de 5.2%, o que pode indicar uma maior presença de óxidos antes da delaminação. O oxigênio não se encontra necessariamente no topo da amostra, uma vez que o EDS analisa uma profundidade de 1-2 μm . Também é importante notar que no ponto 2 foi detectado sódio, que pode ser da solução eletrolítica empregada na preparação superficial do corpo de prova para receber uma nova camada de revestimento.

Antes da delaminação (abaixo da linha azul) parece haver mais deformações superficiais como sulcamentos na superfície do revestimento.

Figura 118 – Interface indicando delaminação de camadas no CP03 **Tabela 31 – Composição química por EDS no revestimento do CP03**

% Massa	O	Na	Al	S	Cr	Co	W
1	10.49				1.59	3.52	84.4
2	14.69	1.02	1.18	0.22	2.03	8.75	72.1
Média	12.59	1.02	1.18	0.22	1.81	6.135	78.25
3	3.97				4.05	13.21	78.77
4	6.37			0.33	2.11	6.81	84.38
Média	5.17			0.33	3.08	10.01	81.58

Na região de interface e saída do jato do corpo de prova 3, conforme figura 119, pode-se notar que há delaminações em uma faixa em torno de 30 μm , que é menor que a faixa encontrada na entrada do jato. Há uma diferença de altura na camada do revestimento, que na transição da saída é maior que na entrada.

Figura 119 – Região de interface na saída do jato no CP03

A interface entre o revestimento e o material base mostra a deformação do revestimento e que os grãos de WC são arrastados ao longo do trajeto da partícula erosiva, conforme mostra a figura 120.

Figura 120 – Interface entre revestimento e material base CP03

O corpo de prova 5 também foi analisado em seu topo e não apresentou delaminação aparente na entrada, conforme mostra figura 121. Os mecanismos de desgaste no material base são de sulcamento e micro corte, sendo que no revestimento é mais predominante a deformação com consequentemente desprendimento de carbonetos.

Figura 121 – Topo próximo à entrada do jato no CP05

Na região próxima à saída do corpo de prova 5 (figura 122) é possível notar o aparecimento de uma região de aproximadamente 60 μm , delimitada por uma área em azul. Provavelmente, trata-se de uma área delaminada, pois a região não apresenta sinais de deformação, como em outras áreas.

Figura 122 – Interface próxima a saída do jato no CP05

O corpo de prova 7 não foi visualizado próximo às regiões de entrada e saída de jato e sim na lateral da zona erodida. Inicialmente, é possível verificar que há diferença de alturas entre as bordas e o centro da amostra, indicado em azul na figura 123.

Figura 123 – Visualização de topo do CP07

Na região central do corpo de prova 7 podem ser observados pontos com delaminações e remoções recentes, indicadas em amarelo na figura 124. O desgaste erosivo em grande parte empurra e arrasta as partículas de WC aparentando uma superfície mais lisa. Quando há uma delaminação ou remoção recente, a superfície parece mais rugosa e profunda, pois ainda não houve deformação por impactos de sedimentos sucessivos.

Figura 124 – Regiões com delaminação no CP07

O seccionamento do corpo de prova 06 (figura 125) mostra em seu lado direito um desprendimento de revestimento ou delaminação que começa na interface e próxima da borda da cratera do substrato com o revestimento e termina a aproximadamente 400 µm dessa interface. O ponto onde ocorreu o desprendimento é condizente com a primeira camada de revestimento aplicada.

Figura 125 – Seccionamento do CP06

Com a observação em maior aumento da região indicada em branco na figura 125 foi realizada uma análise química da região de interface entre a primeira camada de revestimento e a segunda nos pontos indicados em amarelo (5 a 9, da direita para

esquerda) na figura 126 e em um ponto na fenda de uma trinca ilustrado em azul (ponto 10).

A análise química da tabela 32, feita na região de separação, indica uma variação em massa de oxigênio de 2 a 15%, que é maior que a média encontrada no revestimento do corpo de prova 9, que era de 0.45%, o que indica maior presença de óxidos na região. Nos pontos de 5 a 9 (em amarelo na figura 126) há menor concentração de W e aumento na concentração de Co e Cr, mostrando que é a região de remoção eletrolítica do revestimento e que diverge do encontrado no ponto 10 (em azul na figura 126), onde há diminuição na concentração de W, mas não há aumento de Co e Cr.

O mapeamento por EDS ilustrado na figura 126 mostra presença de oxigênio ao longo da interface entre camadas de revestimento.

Figura 126 – Aproximação na abertura encontrada com mapa de oxigênio no CP06

Tabela 32 – EDS nos pontos em amarelo da figura 126

% Massa	Fe	O	N	Na	Al	S	Ca	Ti	V	Cr	Co	Cu	W
5	1.41	15.22		0.25		0.24	0.26			5.06	20.41		57.14
6	0.99	5.6		0.2	0.71	0.11	0.28	0.67		6.88	27.79		56.77
7	0.8	2.06				0.16				11.05	30.04		55.89
8	19.04	3.76			0.9		0.58	0.55		7.12	19.44		48.61
9	2.88	5.09					0.36	0.5		5.69	29.93	3.58	51.96
10	0.31	7.67	2.19			0.13		18.03	0.17	2.61	9.74		59.14
Média	4.24	6.57	2.19	0.23	0.81	0.16	0.37	4.94	0.17	6.40	22.89	3.58	54.92

A figura 127 mostra uma imagem em maior aumento do lado esquerdo da figura 125, onde é possível notar a mesma interface que do lado direito. Na região entre camadas foi realizado EDS (tabela 33) nos pontos 3 e 4. No ponto 3 observou-se maior presença de oxigênio que o esperado, e nos pontos 3 e 4 há balanço condizente com a remoção eletrolítica executada na região.

Figura 127 – Pontos para análise por EDS no lado esquerdo do CP06

Tabela 33 – Composição nos pontos indicados na figura 127

	Fe	O	Na	Mg	S	Ca	Cr	Co	W
3	6.57	15.31	0.91	0.34	0.18	4.53	6.1	17.53	48.54
4	3.17					0.26	7.98	38.69	49.89
Média	4.87	15.31	0.91	0.34	0.22	2.40	5.57	22.15	61.77

Para uma melhor compreensão da distribuição do oxigênio foi realizado um mapeamento por EDS na região em azul da figura 127, o qual é exibido na figura 128. O mapeamento mostra oxigênio em toda a interface entre revestimentos.

Figura 128 – Seccionamento lado esquerdo e mapeamento de oxigênio no CP06

O seccionamento do corpo de prova 7 (figura 129) mostrou o início de um desprendimento do revestimento, onde se vê um afastamento maior entre camada e início de trinca na vertical (circulado em azul). A espessura da camada que está se desprendendo varia de 5 a 29 μm e o ponto a esquerda da trinca vertical possui inicialmente 30 μm.

Figura 129 – Região de interface no seccionamento do CP07

O desprendimento ou delaminação encontrada no corpo de prova 7 é similar ao encontrado no corpo de prova 6, conforme mostra a figura 130. No CP6 a camada logo após a delaminação tem 27.6 μm, que é comparável à camada de 30 μm encontrada no CP7.

Figura 130 – Aumento da região em azul da figura 116 do CP06

A partir da observação do desgaste nos corpos de prova do grupo B é possível dizer que houve desprendimentos ou delaminações em maior quantidade que no grupo A. Os desprendimentos maiores foram encontrados próximos à interface entre a primeira e segunda camada de revestimento, o que indica uma falha coesiva na região.

Apesar da imagem apresentada na figura 130 parecer uma trinca, não se pode afirmar que é uma trinca entre revestimentos, pois a linha de separação visualizada pode ter como origem uma baixa adesão na região aliada à preparação da amostra, ou seja, um fenômeno análogo ao que ocorre durante a preparação de corpos de prova para avaliação de porosidades.

De acordo com o observado na formação do revestimento no item 3.3.1.1, as porosidades maiores são originadas por partículas não totalmente fundidas e as menores em geral por falta de contato entre lamelas. Devido à natureza das porosidades maiores, alguns cuidados devem ser tomados na preparação da amostra para avaliação de porosidades de modo a evitar desprendimento excessivo de partículas com menor adesão, conforme mostra (Schneider, et al., 2006).

Em paralelo, a região entre camadas possui menor coesão, que pode ocasionar desprendimento de partículas durante o processo de corte e polimento da amostra para visualização no microscópio eletrônico de varredura.

A região entre camadas também apresentou presença de oxigênio, conforme evidenciado no seccionamento dos corpos de prova 6 e 7. Para uma melhor compreensão, foi tomado o corpo de prova 9 do ensaio de adesão e verificada a face onde ocorreu a falha coesiva entre a primeira camada de revestimento e a segunda. Deve se notar que a análise ocorreu aproximadamente um ano após o teste de adesão.

Uma das faces do corpo de prova de adesão 9 mostra uma superfície irregular e que apresenta 5.43 % de oxigênio em massa sobre sua superfície inteira, conforme mostra a figura 131 e tabela 34.

Figura 131 – Mapeamento EDS na face do CP de adesão 09

Tabela 34 – Composição química por EDS

O	Na	S	Ti	Cr	Fe	Co	W
5.43	0.15	0.22	0.28	4.55	0.30	13.09	76.00

A outra face do corpo de prova 9 mostra o mesmo tipo de superfície e 6.53 % de oxigênio distribuído por toda a superfície. Apesar do tempo de exposição da superfície ao ar ser muito maior que os corpos de prova seccionados é possível ver que a quantidade em massa de oxigênio está na mesma ordem de grandeza que a

média dos pontos encontrados na tabela 32, logo pode-se dizer que não houve grande influência da exposição prolongada sobre a superfície.

Figura 132 – Mapeamento EDS no contra corpo do cp de adesão 09

Tabela 35 – Composição química por EDS

O	Na	S	Ti	Cr	Fe	Co	W
6.53	0.31	0.20	0.30	3.63	0.36	10.55	78.12

A partir da observação do mapeamento de oxigênio por EDS no topo do corpo de prova de adesão é possível ver que há oxigênio e consequentemente óxidos por toda a superfície do corpo de prova, provavelmente resultantes do processo de remoção eletrolítica. O revestimento de WC-10Co-4Cr não tem ganho significativo de massa por oxidação em temperaturas inferiores a 500°C, conforme visto em (Jafari, et al., 2013), restando somente a hipótese que a oxidação se originou durante a remoção eletrolítica.

O trabalho realizado por (Menini, et al., 2004) trata da oscilação da corrente e que a possível causa é a competição da reação de remoção com a formação de O_2 no anodo. Juntando a formação de O_2 com o fato que após 1 ano da superfície do corpo de prova ficar exposta ao ar e o fato de detecção de oxigênio na interface entre a primeira e segunda camadas, pode-se dizer que o processo de remoção eletrolítica contribuiu de forma significativa como origem da oxidação.

Conforme pode ser visto no capítulo 3.3.1.1, a oxidação da partícula durante seu trajeto causa um menor espalhamento da partícula se comparada a um processo a

vácuo, onde não há presença de oxigênio. Em paralelo, se espera observar que ocorra menor espalhamento das partículas de pó que irão compor o revestimento se a oxidação estiver presente sobre a superfície de impacto.

Também deve-se levar em consideração que a adesão entre camadas foi afetada durante o ensaio a 30°. No entanto, com o aumento do ângulo de impacto haverá maior força vertical, que afetará a região de interface em um reparo e, em consequência, espera-se maior taxa de erosão com o aumento do ângulo.

5.5.3 Pó e revestimento

Comparando os revestimentos encontrados na primeira (figura 133a) e segunda camadas (figura 133b) é possível observar uma presença menor de partículas de WC com tamanho menor que 1 μm e também é possível observar arredondamento das arestas se comparar com as micrografias do pó (figura 60). O mesmo foi observado por (Bolelli, et al., 2015) que identificou a diferença comparando os processos de revestimento, bem como verificou a formação de W_2C e mostrou que essas duas observações provêm do processo de descarbonetação do WC.

Na figura 133, não é possível observar-se diferença significativa entre o tamanho das partículas de WC entre camadas de revestimento.

Figura 133 – Seccionamento do CP07 e tamanho de partículas de WC

6 CONCLUSÕES

O estudo do efeito da remoção eletrolítica para reparo do revestimento de WC-10Co-4Cr permitiu compreender alguns aspectos da preparação superficial deste revestimento. Os materiais utilizados para o estudo foram o aço inoxidável ASTM A743 CA6NM (como substrato) e o pó WC-10Co-4Cr (para revestimento), os quais, através do processo de aspersão térmica por HVOF originaram os corpos de prova de erosão e adesão do presente estudo.

Durante o processo de fabricação do revestimento notou-se que a preparação da superfície de um reparo (interface 1) por jateamento não é adequada por não proporcionar aumento de rugosidade, a qual é essencial para a adesão do revestimento.

A preparação por meio da remoção eletrolítica foi eficaz no aumento da rugosidade superficial da região de reparo (interface 1). No entanto, o ensaio de erosão somado ao ensaio de adesão demonstrou que a preparação não resulta no mesmo resultado que um revestimento sem reparos. A diferença na taxa média de erosão está na faixa de 14-23% e esta ocorre por uma falha coesiva entre camadas.

A falha coesiva ocorre predominantemente na região de preparação onde foi realizada a remoção eletrolítica, responsável por uma camada de óxido. Em consequência, conforme visto na literatura, há maior dificuldade no espalhamento das partículas fundidas de pó e consequentemente menor adesão entre camadas. Este fato difere do que se pensava inicialmente, ou seja, que a adesão poderia ter sido afetada pela menor resistência mecânica dos óxidos.

Os testes de erosão foram realizados em um ângulo de 30° onde a força de arraste (tangente à superfície) é maior que a força de contato (perpendicular à superfície). Por essa razão, espera-se que com o aumento do ângulo ocorra maior influência na região de preparação (interface 1).

Por fim, voltando às perguntas do objetivo inicial pode-se dizer que:

- Não foi possível chegar em um reparo que mantenha a resistência a erosão de um revestimento sem reparo. No entanto, ainda há espaço para melhorias do processo e outros testes.
- O melhor reparo possível será aquele que não apresente falha coesiva no revestimento, e, para tanto, será necessária a remoção da camada de óxido superficial ou um novo processo com as seguintes características: (I) aumento da rugosidade superficial; (II) ausência de dano do revestimento e (III) não formação uma camada de óxido.
- Devido à redução da adesão do revestimento deve-se evitar regiões com impacto a 90° e que tenham alto desgaste. No caso de rotores Pelton, estas regiões são a região de entrada da água e fundo da concha.

TRABALHOS PUBLICADOS E SUGESTÃO PARA TRABALHO FUTURO

- Souza, R. M.; Nagasima, D. M. P. N. Comparison between two surface preparations of WC-10Co-4Cr and their effect on erosion resistance. 24th ABCM International Congress of Mechanical Engineering. Curitiba. 2017.

Para melhorar o processo de preparação de um reparo em revestimento o próximo passo seria a remoção da camada de óxido e verificação do desgaste através do ensaio de erosão.

Além do processo químico, um novo processo de jateamento que não danifique o revestimento, mas aumente sua rugosidade pode ser trilhado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR 6445. 2016. *NBR 6445 - Turbinas hidráulicas, turbinas-bombas e máquinas de acumulação.* Segunda Edição. 2016.

ASM Metals Handbook. ASM Metals Handbook. 1994. 1994, Vols. V-18.

Associação portuguesa de bushcraft. 2002. *Propriedades dos aços inoxidáveis.* 2002.

ASTM B276. 2010. *Standard test method for apparent porosity in cemented carbides.* 2010.

ASTM B499. 2009. *ASTM B 499: Standard test method for measurement of coating thickness by magnetic method: nonmagnetic coatings on magnetic basis metals.* s.l. : ASTM, 2009.

ASTM C633-01. 2013. *ASTM C633-01: Standard test method for adhesion or cohesion strength of thermal spray coatings.* s.l. : ASTM, 2013.

Barr, J., Estrada, C. e White, B. 2013. *Influence of surface contamination on the adhesion strength of HVOF coatings. Proceedings of the international thermal spray conference.* 2013.

Bauccio, M. 1994. *ASM Engineered Materials Reference Book.* s.l. : ASM International, 1994.

Bergman, C. P. e Vicenzi, J. 2011. *Protection against erosive wear using thermal sprayed cermet: A review.* Rio Grande do Sul : Springer, 2011.

Boelli, G., et al. 2015. *Tribology of HVOF and HVOF sprayed WC-10Co4Cr hardmetal coatings: a comparative assessment. Surface & Coatings Technology.* 2015, Vol. V. 265, pp. P. 125-144.

Chen, X., Rowe, W. B. e McCormack, D. F. 2000. *Analysis of the transitional temperature for tensile residual stress in grinding.* 2000, Vol. V. 107, pp. P. 216-221.

Cidra Precision. *Mineral hardness conversion chat. Cidra Precision.* [Online] [Citado em: 28 de 01 de 2017.] <http://www.cidraprecisionservices.com/mohs-conversion.html>.

DIN EN ISO 4288. 1996. *DIN EN ISO 4288: GPS - Surface texture: profile method.* s.l. : DIN EN ISO, 1996.

DIN EN ISO 6507. 2005. *DIN EN ISO 6507: Metallic materials - Vickers hardness test - Part 1 Test method.* s.l. : DIN EN ISO, 2005.

Duan, C. G. e Karelin, V. Y. 2002. *Abrasive erosion and corrosion of hydraulic machinery.* London : Imperial College Press, 2002.

Espinoza, A. M. 2016. Managing sediment in Peru's Pativilca river basin. *Hydro World*. [Online] 2016. [Citado em: 17 de 12 de 2016.] <http://www.hydroworld.com/articles/print/volume-24/issue-4/features/managing-sediment-in-peru-s-pativilca-river-basin.html>.

Fraunhofer-Institut für Werkstoff und Strahtechnik. 2015. Brochure: Quality assessment of thermally sprayed coatings. [Online] 10 de 03 de 2015. [Citado em: 18 de 12 de 2016.] http://www.iws.fraunhofer.de/content/dam/iws/en/documents/publications/product_sheets/600-3_LAwave_en.pdf.

Gant, A. J. e Gee, M. G. 2015. Wear modes in slurry jet erosion of tungsten carbide hardmetals: Their relationship with microstructure and mechanical properties. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2015, Vol. V. 49, pp. P. 192-202.

Goyal, D. K., et al. 2012. Slurry erosion behaviour of HVOF sprayed Wc-10Co-4Cr and Al₂O₃+13TiO₂ coatings on turbine steel. *Wear*. 2012, Vol. V. 289, pp. P. 46-57.
Grewal, H. S., Bhandari, S. e Singh, H. 2012. Parametric study of slurry-erosion of hydroturbine steels with an without detonation gun spray coatings using Taguchi technique. 2012, Vol. V 43A, pp. P 3387-3401.

GTV Verschleiss-Schutz GmbH. 2012. GTV Spray Powder Catalogue. *GTV Verschleiss-Schutz GmbH*. [Online] 08 de 2012. [Citado em: 14 de 05 de 2015.] http://www.gtv-mbh.com/_old/gtv-mbh-englisch/www.gtv-mbh.de/cms/upload/downloads/GTV_Spray_Powder_Catalogue_08-2012.pdf.

Gui, M., et al. 2012. Influence of processing parameters on residual stress of high velocity oxy-fuel thermally sprayed WC-Co-Cr coating. 2012, Vol. V 21, pp. P 2090-2098.

Hadad, M., et al. 2007. Wear performance of sandwich structured WC-Co-Cr thermally sprayed coatings using different intermediate layers. 2007, Vol. V 263, pp. P 691-699.

Hamilton, A., Sharma, A. e Pandel, U. 2017. Solid particle erosion resistance of HVOF sprayed WC-10Co-4Cr coating on CA6NM steel. *Surface review and letters*. 2017, Vol. V. 24 Suppl. 1.

Hard Chrome Alternatives Team. 2004. *Validation on HVOF thermal spray coatings as replacements for hard chrome plating on hydraulic/pneumatic actuators Part I - Coupon Testing*. s.l.: U.S. department of defense, 2004. Vols. Part I - Coupon testing.

Hasui, A., Kitara, S. e Fukushima, T. 1970. Relation between properties of coating and spraying angle in plasma spraying. *Transactions of National Research Institute for Metals*. Ed. 1, 1970, Vol. V. 12, pp. P. 9-20.

Hawthorne, H. M., et al. 1999. Comparison of slurry and dry erosion behaviour of some HVOF thermal sprayed coatings. *Wear*. 1999, Vols. V. 225-229, pp. P. 825-834.

Hutchings, I. M. 1992. *Tribology: Friction and wear of engineering materials*. s.l. : Butterworth Heinemann, 1992.

IEC60609. 2004. *IEC 60609 - Part 1: Evaluation in reaction turbines, storage pumps and pump-turbines*. 2004.

Jafari, M., et al. 2013. Comparison between oxidation kinetics of HVOF sprayed WC-12Co and WC-10Co-4Cr coatings. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2013, Vol. V. 41, pp. P. 78-84.

Krepiski, R. P. 1993. *Thermal spray coating applications in chemical process industries*. Houston, EUA : Nace International, 1993. p. 252.

Liang, Q. 2015. World hydropower congress: Sediment management. [Online] 21 de 05 de 2015. [Citado em: 12 de 12 de 2016.] <https://www.hydropower.org/sites/default/files/publications-docs/Quanwei-Liang-Dongfang-Electric-Machinery-Co-sediment-management-World-Hydropower-Congress.pdf>.

Lima, C. C. e Trevisan, C. 2007. *Aspersão térmica: fundamentos e aplicações*. Segunda edição. São Paulo : Artliber, 2007.

Lima, C. R. C. L. e Guilemany, J. M. 2007. Adhesion improvements of thermal barrier coatings with HVOF thermally sprayed bond coats. 2007, Vol. V 201, pp. P 4694-4701.

Lima, C. R. C. 1996. *Proposta de um novo método de aplicação de revestimentos metal-cerâmico por aspersão térmica a plasma*. Faculdade de engenharia mecânica, Universidade estadual de campinas. Campinas : s.n., 1996. p. 183, Tese de doutorado.

Malik, J., et al. 2014. Evaluating the effect of hardness on erosion characteristics of aluminum and steels. *Journal of materials engineering and performance*. June de 2014, Vol. V. 23, pp. P. 2274-2282.

Maranho, O. 2006. *Aspersão térmica de ferro fundido multicomponente*. Escola politécnica da universidade de São Paulo. São Paulo : s.n., 2006.

Masoumi, H., et al. 2014. Effect of grinding on the residual stress and adhesion of HVOF thermally sprayed WC-10Co-4Cr coating. *Materials and manufacturing processes*. 2014, Vol. V. 29, pp. P. 1139-1151.

McPherson, R. 1989. A review of microstructure and properties of plasma sprayed ceramic coatings. *Surface and coatings technology*. 1989, Vol. V. 39/40, pp. P. 173-181.

Mellali, M., Fauchais, P. e Grimaud, A. 1996. Influence of substrate roughness and temperature on the adhesion/cohesion of alumina coatings. *Surface and coatings technology*. 1996, Vol. 81, pp. 275-286.

Menini, R., Salah, N. B. e Nciri, Rachid. 2004. Stripping methods studies for HVOF WC-10Co-4Cr coating removal. 2004, Vol. V 13, pp. P 185-194.

Meyers, M. e Chawla, K. 2009. *Mechanical behavior of materials*. Second edition. s.l. : Cambridge, 2009.

Murthy, J. K. N., Rao, D. S. e Venkataraman, B. 2001. Effect of grinding on the erosion behavior of a WC-Co-Cr coating deposited by HVOF and detonation gun spray processes. *Wear*. 2001, Vol. 249, pp. P. 592-600.

Murugan, K., et al. 2014. Optimizing HVOF spray process parameters to attain minimum porosity and maximum hardness in WC-10Co-4Cr coatings. 2014, Vol. V 247, pp. P 90-102.

Neopane, H. P. 2010. *Sediment erosion in hydro turbines (tese de doutorado)*. Noruega : s.n., 2010.

Oka, Y. I. e Yoshida, T. 2005. Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact. Part 2: Mechanical properties of materials directly associated with erosion damage. *Wear*. 2005, Vol. V. 259, pp. P. 102-109.

Oka, Y. I., Okamura, K. e Yoshida, T. 2005. Practical estimation of erosion damage by solid particle impact. Part 1: Effects of impact parameters on a predictive equation. *Wear*. 2005, Vol. V. 259, pp. P. 95-101.

Oliver, W. C. e Pharr, G. M. 1992. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. *Journal of materials research*. 1992, Vol. V. 7, pp. P. 1564-1583.

Padhy, M. K. e Saini, R. P. 2012. Study of silt erosion mechanism in Pelton turbine buckets. *Energy*. 2012, Vol. V. 39, pp. P. 286-293.

Perez, N. P. 2014. Sistemas fluidomecânicos: Turbinas hidráulicas. [Online] 2014. [Citado em: 12 de 12 de 2016.] <http://www2.feg.unesp.br/Home/PaginasPessoais/nestorproenzaperez/sfm-2014-aula-27.pdf>.

Rai, A. K. e Kumar, A. 2016. Analysing hydro abrasive erosion in Kaplan turbine: A case study from India. *Journal of Hydrodynamics*. 2016, Vol. V 28, pp. P 863-872.

Ramírez, A. L., et al. 2016. Failure analysis of runner blades in a Francis hydraulic turbine - case study. 01 de 2016, Vol. V 59, pp. P 314-325.

Ross, R. B. 1992. *Metallic materials specifications handbook*. s.l. : Springer Science + Business Media, 1992.

SAE HS-84. 2001. *SAE - Manual on shot peening*. 4 edição. 2001.

Saeed, R. A., Galybin, A. N. e Popov, V. 2010. Modelling of flow-induced stresses in a Francis turbine runner. 12 de 2010, Vol. V 41, Issue 12, pp. P 1245-1255.

Sampath, S. e Herman, H. 1996. Rapid solidification and microstructure development during plasma spray deposition. *Journal of thermal spray technology*. 1996, Vol. V. 5, pp. P. 445-456.

Santa, J. F., et al. 2009. Slurry and cavitation erosion resistance of thermal sprayed coatings. 2009, Vol. V 267, pp. P 160-167.

Schneider, K. E., et al. 2006. *Thermal spraying for power generation components*. Weinheim : Wiley-VCH, 2006.

Selvadurai, U., et al. 2015. Influence of the handling parameters on residual stresses of HVOF sprayed WC-12Co coatings. *Surface and coatings technology*. 2015, Vol. V. 268, pp. P. 30-35.

Silva, B. L., et al. 2007. Characterization of ASTM A743 alloy steel used in hydrogenerator components. [ed.] COBEM. 12 de 2007.

Silva, E. C. N. 2016. PMR 2481 - Sistemas fluidomecanicos para mecatrônica. *Site da disciplina PMR 2481 - Sistemas fluidomecanicos para mecatrônica*. [Online] 07 de 2016. [Citado em: 11 de 12 de 2016.] <http://sites.poli.usp.br/d/pmr2481/Aula04-Tur.pdf>.

Sulzer Metco. 2000. *Diamond Jet HVOF Gun: Instructions*. Instruction 56868, Issue A. s.l. : Sulzer Metco, 2000.

Sulzer Metco; Brastak. 2006. *Comparativo - Sistemas HVOF: Combustível líquido vs. Gasoso*. 2006.

Thapa, B. S., Thapa, B. e Dahlhaug, O. G. 2012. Current research in hydraulic turbines for handling sediments. 2012, Vol. V 47, pp. P 62-69.

Thapa, B. 2004. *Sand erosion in hydraulic machinery (tese de doutorado)*. 2004.

Thiruvikraman, C., Balasubramanian, V. e Sridhar, K. 2014. Optimizing HVOF parameters to maximize bonding strength of WC-CrC-Ni Coating on AISI 304L stainless steel. 2014, Vol. V 23, pp. P 860-875.

Vardelle, M., et al. 1994. Dynamics of splat formation and solidification in thermal spraying processes. *Proceedings of the 7th national thermal spray conference*. 22-24 de Junho de 1994.

Verdon, C., Karimi, A. e Martin, J. L. 1997. Microstructural and analytical study of thermally sprayed WC-Co coatings in connection with their wear resistance. 1997, Vol. V 236, pp. P 731-734.

Voith Hydro 1. 2013. Voith Hydro Brochure: Francis turbines. [Online] 27 de 05 de 2013. [Citado em: 16 de 12 de 2016.] http://voith.com/en/2013-05-27_voith_francis_turbines.pdf.

Voith Hydro. 2013. Voith Hydro Brochure: Pelton turbines. [Online] 27 de 05 de 2013. [Citado em: 16 de 12 de 2016.] http://voith.com/de/2013-05-27_voith_pelton_turbines.pdf.

Wang, Q., Tang, Z. e Cha, L. 2015. Cavitation and sand slurry erosion resistances of WC-10Co4Cr. *Journal of materials engineering and performance*. 2015.

Wang, Y. Y., Li, C. J. e Ohmori, A. 2005. Influence of substrate roughness on the bonding mechanisms of high velocity oxy-fuel sprayed coatings. 2005, Vol. V 485, pp. P 141-147.

Wheeler, W., D. e Wood, R. J. K. 2005. Erosion of hard surface coatings for use in offshore valves. 2005, Vol. V 258, pp. P 526-536.

Winkler, K. 2014. Hydro-abrasive erosion: Problems and solutions. *27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems (IAHR 2014)*. 2014.

ANEXO A: MEMORIAL DA ESTIMATIVA DA TAXA DE DESGASTE

O modelo apresentado por (Oka, et al., 2005) é um modelo preditivo baseado em ensaios já realizados para os seguintes materiais erosivos: SiO₂, SiC e microesfera de vidro.

O material que mais se aproxima dos sedimentos conforme tabela 11 é o SiO₂, que é o maior componente do quartzo. Baseando-se no dióxido de silício tem-se os parâmetros conforme tabela 36.

Tabela 36 – Parâmetros para o SiO₂ – 1

K	k ₁	k ₂	k ₃	v'(m/s)	D' (μm)
65	-0.12	2.3. (H _V) ^{0.038}	0.19	104	326

As condições de desgaste relacionadas a partícula erosiva já foram definidas: v = 71 m/s, D = 302.5 μm e características da tabela 36. Na sequência faltam as seguintes propriedades atreladas ao material erodido: a, b.

Para fins de estimativa foram tomados como base para a e b, os aços inoxidáveis martensíticos S3 e S4.

Os valores de a e b não são mostrados de forma direta em (Oka, et al., 2005) – Parte 2, mas o artigo possui dois gráficos onde um relaciona b com a taxa de desgaste e o outro relaciona $(a \cdot H_V)^{-b}$.

A partir dos gráficos das figuras 10 e 11 da parte 2 do artigo do (Oka, et al., 2005), chegaram-se nos seguintes constantes na tabela 37.

Tabela 37 – Valores de a, b baseado nos gráficos do artigo

	S3	S4
a	0.015	0,019
b	0.556	1.251

Como forma de checagem dos valores obtidos, foi executado o cálculo da taxa de desgaste conforme equação 3 e comparado o resultado com os valores de desgaste encontrados pelo gráfico da figura 2 do artigo do (Oka, et al., 2005) – parte 1.

Tabela 38 – Checagem e comparação

	Experimental (mm ³ /kg)	Cálculo (mm ³ /kg)
S3	116,31	77.90
S4	93.68	92.67

Comparando os resultados encontrados na tabela 38 com a figura 12a do artigo do (Oka, et al., 2005) – parte 2 pode-se ver que o maior desvio do experimental para o calculado dentre os aços inoxidáveis está para o que possui a maior taxa de desgaste que é o S3.

Os últimos coeficientes que faltam são o n_1 e n_2 da equação que contabiliza o efeito da inclinação no desgaste equação 4. Os dois coeficientes são calculados pela equação 6.

$$n_1 = n_2 = s \cdot (H_V)^q \quad \text{Eq. 6}$$

Onde s e q são coeficientes determinados pelo tipo de material erodente, e diferem para n_1 e n_2 .

Tabela 39 – Coeficientes para cálculo de n_1 e n_2

n_1		n_2	
s	q	s	q
0.71	0.14	2.4	-0.94

Por fim, aplicando a equação 3 com $v = 71$ m/s, $D = 302.5$ μm , $H_V = 280$ HV $\sim$ 2.75GPa e $\alpha = 30^\circ$, tem-se uma taxa de desgaste com base no S3 de 0.310 mg/g e para o S4 de 0.389 mg/g.