



**UNIVERSIDADE DE LISBOA
INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA**

**AVALIAÇÃO DO SISTEMA TRIBOLÓGICO ATUANTE EM PÁS DE TURBINA
DOS CONVERSORES DE ENERGIA DAS ONDAS DO TIPO COLUNA DE ÁGUA
OSCILANTE (CENTRAL DE ONDAS DO PICO – AÇORES)**

DIOGO LINO BRUSCHI

Orientadores: Doutor João Carlos Salvador Santos Fernandes

Doutor Carlos Pérez Bergmann

Co-orientador: Doutor António Franco de Oliveira Falcão

**Tese aprovada em provas públicas para obtenção do Grau de Doutor em
Engenharia de Materiais
Qualificação atribuída pelo Júri: Aprovado**

2020



**UNIVERSIDADE DE LISBOA
INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA**

**AVALIAÇÃO DO SISTEMA TRIBOLÓGICO ATUANTE EM PÁS DE TURBINA
DOS CONVERSORES DE ENERGIA DAS ONDAS DO TIPO COLUNA DE ÁGUA
OSCILANTE (CENTRAL DE ONDAS DO PICO – AÇORES)**

DIOGO LINO BRUSCHI

Orientadores: Doutor João Carlos Salvador Santos Fernandes

Doutor Carlos Pérez Bergmann

Co-orientador: Doutor António Franco de Oliveira Falcão

**Tese aprovada em provas públicas para obtenção do Grau de Doutor em
Engenharia de Materiais**

Qualificação atribuída pelo Júri: Aprovado

Júri

Doutora Annelise Kopp Alves, Escola de Engenharia - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Doutora Sabrina Arcaro, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Brasil

Doutora Maria de Fátima Grilo da Costa Montemor, Instituto Superior Técnico - Universidade de Lisboa

Doutora Maria Teresa Oliveira de Moura e Silva, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa - Instituto Politécnico de Lisboa

INSTITUIÇÕES FINANCIADORAS

Erasmus Mundus - SMART²; CQE (FCT) - UID/QUI/00100/2019 e IDMEC/LAETA (FCT) - UID/EMS/50022/2019

2020

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família, em especial à minha esposa Daiane.

RESUMO

Este trabalho buscou investigar os fenômenos tribológicos atuantes no processo de desgaste das pás da turbina da Central de Ondas do Pico (COP). A análise do material da turbina evidenciou uma preocupação inicial de resistência a esforços mecânicos e químicos, devido a sua proximidade à atmosfera marítima. No entanto, o desgaste acentuado da turbina, durante seu funcionamento, despertou a investigação sobre um possível mecanismo de desgaste erosivo. A compreensão fenomenológica sobre os mecanismos atuantes no processo de desgaste foi obtida através de ensaios erosivos-corrosivos. Os ensaios de Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE), em amostras de alumínio com e sem desgaste superficial, evidenciaram que as elevadas propriedades de resistência à corrosão são perdidas em superfície com rugosidade, resultante de desgaste erosivo. Um revestimento por aspersione térmica, do tipo *High Velocity Oxy-Fuel* (HVOF) à base de WC-CoCr passou pelos mesmos ensaios de EIE, com e sem desgaste superficial, tendo sido observado que a propriedade de resistência à corrosão foi pouco afetada pela erosão. Os ensaios erosivos, utilizando solução salina 3,5% NaCl, areia calibrada e uma mistura de ambos, mostraram que há diferenças de desgaste em função do tipo de erodente atuante sobre a superfície dos corpos-de-prova. A utilização de ar com solução salina mostrou-se dependente da velocidade de impacto com que as gotas atingem a superfície do material alvo. Já com a utilização do particulado sólido outras variáveis ganharam importância maior, tais como dureza, quantidade de erodente utilizada, granulometria e ângulo de impacto. As análises de erosão-corrosão sobre materiais com e sem desgaste mecânico, indicaram que a colisão, principalmente do particulado sólido, rompe a fina camada de óxido, causando uma microfissura que promove um caminho de aceleração do desgaste químico por corrosão por pite, cujo fenômeno resulta em um sinergismo, onde a erosão-corrosão oferece taxas de degradação superiores as de ações desses mesmos mecanismos atuando isoladamente. A partir dos resultados obtidos, contribui-se com os requisitos das propriedades de materiais para fabricação das turbinas de conversores do tipo Coluna de Água Oscilante (OWC – *Oscillating Water Column*), pois a durabilidade, a eficiência e a vida útil dos materiais utilizados nessas turbinas são fatores relevantes para o avanço da geração de eletricidade por uso da energia das ondas.

Palavras-chave: Energia das ondas. Corrosão. Erosão. Coluna de água oscilante. Tribologia.

ABSTRACT

This work aimed to investigate the tribological phenomena active in the process of wear of Pico Power Plant (COP) turbine blades. The analysis of the turbine material showed an initial concern of resistance to mechanical and chemical efforts, due to its proximity to the maritime atmosphere. However, the sharp wear of the turbine, during its operation, aroused research on a possible mechanism of erosive wear. Phenomenological understanding of the mechanisms active in the wear process was obtained through erosive-corrosive assays. Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) assays, in aluminum samples with and without surface wear, showed that the high corrosion resistance properties are lost on rough surface resulting from erosive wear. A WC-CoCr-based High Velocity Oxy-Fuel (HVOF) thermal spray coating underwent the same EIS assays, with and without surface wear, and it was observed that the corrosion resistance property was little affected by erosion. Erosive assays, using 3.5% NaCl saline solution, calibrated sand and a mixture of both, showed that there are differences in wear as a function of the type of erosive medium acting on the surface of the specimens. The use of air with saline solution was dependent on the impact speed with which the drops reach the surface of the target material. With the use of solid particulate matter other variables gained greater importance, such as hardness, amount of erosive medium used, granulometry and impact angle. Erosion-corrosion analyses on materials with and without mechanical wear indicated that the collision, mainly of the solid particulate, breaks the thin layer of oxide, causing a microfissure that promotes a path of acceleration of chemical wear by pit corrosion, whose phenomenon results in synergism, where erosion-corrosion offers degradation rates higher than those of actions of these same mechanisms acting alone. From the results obtained, it contributes to the requirements of the properties of materials for the manufacture of Oscillating Water Column (OWC) turbines, because the durability, efficiency and useful life of the materials used in these turbines are relevant factors for the advancement of electricity generation by use of wave energy.

Key-words: Wave energy. Corrosion. Erosion. Oscillating water column. Tribology.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, à minha esposa, Daiane, por todo amor e compreensão em minhas ausências, e também por ler e reler este trabalho em busca de correções. Ainda que de um tema desconhecido, não mediu esforços para compreender e acrescentar. Aproveito e alongo este agradecimento aos demais membros da minha família.

Aos meus orientadores, professores Carlos Pérez Bergmann, António Falcão e João Salvador, por nossas conversas, pela confiança, disponibilidade e ensinamentos que possibilitaram a realização deste trabalho.

Ao Erasmus Mundus por ter me concedido uma bolsa de estudos pelo programa Smart², sendo possível minha permanência próxima ao objeto de estudo – Central de Ondas do Pico.

À Universidade Federal de Rio Grande do Sul que me possibilitou um ensino gratuito e de qualidade, aos professores e funcionários do PPGE3M por todo conhecimento transmitido e serviço prestado, em especial aos professores Lírio Schaeffer, Célia Malffati, Afonso Reguly, Jane Zoppas e Tiago Falcade.

Ao Instituto Superior Técnico que me acolheu em Lisboa. Aos professores e colegas do DEQ e em especial aos professores Carlos Guimarães e Amélia Almeida. Também aos amigos Ivan Bastos, Miguel Ferreira e Diogo Neves pela amizade e por estarem sempre disponíveis para ajudar.

Ao WavEC por disponibilizar todo seu arquivo técnico e operacional da Central de Ondas do Pico, em especial à diretora Ana Britto e Melo por seu apoio e ao engenheiro Kieran Monk. Ao engenheiro Rommel Santos da empresa Voith Hydro (antiga WaveGen).

À Associação Brasileira do Alumínio que forneceu, juntamente ao Grupo Recicla BR e Latasa, os substratos de alumínio utilizados nos ensaios erosivos e corrosivos desta pesquisa (ver anexo I). À Rizeja que confeccionou os corpos-de-prova com revestimento HVOF de carboneto de tungstênio-cobalto-cromo.

Aos amigos Lucas de Vargas, Patrick Regner e Otávio Krey pelo apoio durante a etapa de confecção do equipamento para ensaio erosivo.

À banca avaliadora, Prof^a. Annelise Kopp Alves, Prof^a. Maria de Fátima Montemor, Prof^a. Sabrina Arcaro e Prof^a. Teresa Moura e Silva pelo tempo dedicado e pelas sugestões. É uma honra tê-las avaliando este trabalho. Por fim, a todos que contribuíram de alguma forma na elaboração deste trabalho.

ÍNDICE

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| DEDICATÓRIA | III |
| RESUMO | V |
| ABSTRACT | VII |
| AGRADECIMENTOS | IX |
| ÍNDICE | XI |
| LISTA DE FIGURAS | XIII |
| LISTA DE TABELAS | XXI |
| LISTA DE ABREVIATURAS | XXIII |
| LISTA DE SÍMBOLOS | XXV |
| 1 INTRODUÇÃO | 3 |
| 1.1 DA ENERGIA DAS ONDAS | 3 |
| 1.2 DA CENTRAL DE ONDAS DA ILHA DO PICO | 12 |
| 1.3 DO DESGASTE ACENTUADO OCORRIDO NA TURBINA DA COP | 17 |
| 2 OBJETIVOS | 27 |
| 2.1 OBJETIVO GERAL | 27 |
| 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 27 |
| 3 REFERENCIAL TEÓRICO | 31 |
| 3.1 CONDIÇÕES DE FUNCIONAMENTO DA TURBINA DA COP | 31 |
| 3.2 O AMBIENTE MARINHO | 36 |
| 3.3 MATERIAIS DAS TURBINAS OWC..... | 38 |
| 3.4 EROÇÃO POR PARTICULADO SÓLIDO E POR IMPACTO DE GOTA DE ÁGUA SALINA | 44 |
| 3.5 CORROSÃO POR PITE..... | 54 |
| 3.6 SINERGISMO | 62 |
| 3.7 ASPERSÃO TÉRMICA | 66 |
| 3.7.1 <i>HVOF – High Velocity Oxy-Fuel</i> | 69 |
| 3.7.2 <i>Carboneto de tungstênio-cobalto-cromo – WC-CoCr</i> | 70 |
| 4 PROJETO E CONSTRUÇÃO DE EQUIPAMENTOS PARA ENSAIOS DE DESGASTE EROSIVO COM USO SIMULTÂNEO DE PARTÍCULAS SÓLIDAS E DE LÍQUIDO NO JATO DE AR ERODENTE | 77 |
| 4.1 OBJETIVO..... | 77 |

| | | |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.2 | LIMITAÇÕES..... | 77 |
| 4.3 | ANÁLISE DA NORMA ASTM G76-95 | 78 |
| 4.4 | APRESENTAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS CONSTRUÍDOS..... | 80 |
| 4.5 | CONDIÇÕES PADRÃO DE TRABALHO..... | 85 |
| 4.6 | PROCEDIMENTO DE REALIZAÇÃO DE TESTE EROSIVO..... | 86 |
| 5 | METODOLOGIA | 91 |
| 5.1 | FLUXOGRAMA DA PARTE EXPERIMENTAL DA TESE..... | 91 |
| 5.2 | FASE 1 – APLICAÇÕES DEPENDENTES DE ANÁLISES <i>IN LOCO</i> NA COP | 93 |
| 5.3 | FASE 2 – PREPARAÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA..... | 98 |
| 5.4 | FASE 3 – ENSAIOS EROSIVOS PRÉ CORROSÃO..... | 101 |
| 5.5 | FASE 4 – ENSAIOS DE CORROSÃO..... | 103 |
| 5.6 | FASE 5 – ENSAIOS DE EROSÃO..... | 106 |
| 6 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 111 |
| 6.1 | CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL E DA NATUREZA DOS PROCESSOS DE DEGRADAÇÃO OCORRIDOS NA TURBINA DA COP | 111 |
| 6.2 | AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO À CORROSÃO E À CORROSÃO COM DESGASTE | 122 |
| 6.2.1 | <i>Preparação de amostras desgastadas para testes de corrosão.....</i> | <i>122</i> |
| 6.2.2 | <i>Comportamento do substrato de AA5052 H38.....</i> | <i>123</i> |
| 6.2.3 | <i>Comportamento do revestimento de WC-CoCr.....</i> | <i>125</i> |
| 6.2.4 | <i>Substrato AA5052 H38 vs revestimento de WC-CoCr.....</i> | <i>127</i> |
| 6.3 | AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DAS CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS NOS RESULTADOS DOS TESTES DE EROSÃO..... | 134 |
| 6.3.1 | <i>Superfícies WC-CoCr e A356.0 T6/AlSi₇Mg_{0,3} sobre efeito de desgaste erosivo somente com solução salina</i> | <i>134</i> |
| 6.3.2 | <i>Superfícies WC-CoCr e A356.0 T6/AlSi₇Mg_{0,3} sobre efeito de desgaste erosivo com solução salina e areia calibrada.....</i> | <i>137</i> |
| 6.3.3 | <i>Desgaste erosivo com ângulo de impacto a 90° vs ângulo de impacto 45°.....</i> | <i>141</i> |
| 7 | CONCLUSÕES | 151 |
| 8 | SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS | 163 |
| | BIBLIOGRAFIA | 165 |
| | – ANEXO I –..... | 175 |
| | – ANEXO II – | 177 |
| | – ANEXO III –..... | 179 |
| | – ANEXO IV –..... | 181 |
| | – ANEXO V – | 183 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Estimativa das potências de onda média globais em kW/m e média anual das melhores direções. (GUNN; STOCK-WILLIAMS, 2012). | 5 |
| Figura 2 – Curva de <i>Grubb</i> para diferentes tecnologias de energias renováveis. Adaptado de (BEDILION; BOORAS; MCGOWIN; PHILLIPS <i>et al.</i> , 2010). | 6 |
| Figura 3 – OWC: projeção em vista de corte e esquema de funcionamento. Adaptado de (SEED; LANGSTON, 2010), (WENGENMAYR; BÜHRKE, 2011) e (DRESSER-RAND, 2015). | 9 |
| Figura 4 – Fotos de OWCs instalados ao redor do mundo. Adaptado de (FALCÃO, 2015; FALCÃO; HENRIQUES, 2016). | 10 |
| Figura 5 – Esquema de OWCs instalados ao redor do mundo. Adaptado de (FALCÃO, 2010). | 10 |
| Figura 6 – COP vista de vários ângulos: vista lado terra (a), vista lado mar (b) e em um dia de mar agitado (c). | 14 |
| Figura 7 – Energia aproveitada pela EDA proveniente da geração da COP. | 15 |
| Figura 8 – A COP após o colapso parcial da estrutura de fundação que ocorreu em 17 de abril de 2018. | 16 |
| Figura 9 – Imagens datadas de 1999: conjunto gerador turbina (a) e turbina (b). | 17 |
| Figura 10 – Projeção do jato de ar com arraste de água e microparticulados. (WAVEGEN). .. | 18 |
| Figura 11 – Fotografia tirada digitalmente de um vídeo do funcionamento da COP para mostrar o <i>spray</i> de água que passou pela turbina e chegou à atmosfera. (WAVEC). | 18 |
| Figura 12 – Fotografias tiradas em 2011 e 2012 mostrando o desgaste nas pás da turbina. Cortesia do WavEC. | 19 |
| Figura 13 – Imagens datadas de 2017 mostrando o desgaste nas pás da turbina (a), lado terra com fissuras, cicatrizes de erosão nas bordas de ataque (b) e lado mar com cicatrizes similares ao lado terra (c). | 20 |
| Figura 14 – Número de publicações mostradas no website www.periodicos.capes.gov.br correlacionadas as áreas de estudo. Acessado em 04/12/2020. | 22 |
| Figura 15 – Temperaturas médias, máximas e mínimas encontradas no local de instalação da central do Pico. Adaptado de (INSTITUTE; CORPORATION). | 31 |
| Figura 16 – Série temporal da pressão de ar dentro da câmara: a) com válvulas fechadas (aquisição em intervalos de 0,2s) e b) com válvulas em funcionamento (aquisição em | |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| intervalos de 1min, sendo que as curvas em vermelho, preto e azul representam valores obtidos de três sensores simultaneamente). Adaptado de (LE CROM; BRITO-MELO; NEUMANN; SARMENTO, 2009; SARMENTO, 2010). | 33 |
| Figura 17 – Elevação da superfície livre da água dentro da câmara de ar em comparação com os valores da pressão de ar dentro da câmara. Adaptado de (SARMENTO, 2010). | 33 |
| Figura 18 – Pressão dinâmica em ambos os lados da turbina. Adaptado de (SARMENTO, 2010). | 34 |
| Figura 19 – Fluxo de ar no duto da turbina comparado com o fluxo de ar deslocado pela ação de movimento da superfície livre de água dentro da câmara de ar. Adaptado de (SARMENTO, 2010). | 34 |
| Figura 20 – Série temporal de dois minutos que representa a variação da pressão estática e o fluxo de ar no duto da turbina da Central do Pico. Adaptado de (NEUMANN; BRITO E MELO; LE CROM, 2001a). | 35 |
| Figura 21 – Pressões estáticas em ambos os lados da turbina (terra e mar) e no interior da câmara de ar. Adaptado de (SARMENTO, 2010). | 35 |
| Figura 22 – Fragmento de rocha vulcânica, coletada pelo autor, com medidas aproximadas de 2 cm ² e massa 5 g (a), micrografia (b) e respectiva análise química (c). | 38 |
| Figura 23 – Influência da taxa de fluxo de partículas erosivas na taxa de erosão de um aço 1018 (ANAND; HOVIS; CONRAD; SCATTERGOOD, 1987). | 47 |
| Figura 24 – Esquema ilustrando a geometria do impacto da erosão de particulado sólido. Adaptado de (ANAND; HOVIS; CONRAD; SCATTERGOOD, 1987). | 47 |
| Figura 25 – Resultados experimentais para a erosão de um metal dúctil (linha contínua) e os três mecanismos postulados para remoção de material. Adaptado de (FINNIE, 1995)... | 49 |
| Figura 26 – Balanço da energia no impacto de partículas erodentes angulares no ângulo de impacto de 30°. A remoção de material ocorre pelo mecanismo de corte do tipo I. Adaptado de (HUTCHINGS, 1977). | 50 |
| Figura 27 – Balanço da energia no impacto de partículas erodentes esféricas no ângulo de impacto de 30°. A remoção de material ocorre pelo mecanismo de formação de sulcos. Adaptado de (HUTCHINGS, 1977). | 51 |
| Figura 28 – Balanço da energia no impacto de partículas erodentes esféricas no ângulo de impacto de 90°. Adaptado de (HUTCHINGS, 1977). | 52 |
| Figura 29 – Desenho esquemático do impacto de gota líquida sobre uma superfície sólida e rígida apresentando as três ondas geradas pelo impacto (a) e a deformação da gota compactada (b). Adaptado de (ZHANG; JOHANSEN; BERNAD; KIIL, 2015). | 53 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 30 – Diferentes configurações de pites. (G46-94, 2013). | 55 |
| Figura 31 – Esquema do processo de formação de um pite na superfície de um metal. (FONTANA; GREENE, 1986)..... | 57 |
| Figura 32 – Padrão de comparação para a densidade, tamanho e profundidade de pites. (JONES, 1992)..... | 58 |
| Figura 33 – Circuitos elétricos equivalentes para o alumínio passivo (a) e para o alumínio com ataque por pite (b). Adaptado de (MANSFELD; FERNANDES, 1993)..... | 61 |
| Figura 34 – Esquema ilustrativo do mecanismo de remoção da película passiva por ação mecânica de partículas abrasivas. (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2005). | 65 |
| Figura 35 – Processo de aspersão térmica em função da fonte de calor. | 67 |
| Figura 36 – Microestrutura típica de revestimentos aspergidos termicamente. Adaptado de (ENGLAND). | 67 |
| Figura 37 – Representação esquemática do processo de aspersão térmica hipersônico. Adaptado de (ENGLAND)..... | 69 |
| Figura 38 – Imagens SEM de pó WC-CoCr: morfologia dos pós (a) e microestrutura transversal (b). (PICAS; PUNSET; BAILE; MARTÍN <i>et al.</i> , 2009) | 71 |
| Figura 39 – Micrografia (10x) de uma seção em corte de um corpo-de-prova de alumínio A356.0 T6/AlSi ₇ Mg _{0,3} revestido por WC-CoCr através da técnica de aspersão térmica HVOF. | 72 |
| Figura 40 – Micrografia mostrando a morfologia de alguns óxidos formados na superfície do revestimento WC-CoCr HVOF, após realização de testes de polarização cíclica e as correspondentes microanálises EDS. (PICAS; PUNSET; RUPÉREZ; MENARGUES <i>et al.</i> , 2019)..... | 74 |
| Figura 41 – Desenho esquemático de equipamento de erosão de partículas sólidas. Adaptado de (G76-13, 2013)..... | 79 |
| Figura 42 – Equipamento para desgaste erosivo EEEv1, construído em 2017 (IST, Lisboa): vista superior (a) - base em acrílico transparente (3), tira elástica (5), cantoneiras perfuradas (6 e 7), corpo-de-prova (8), barra central (9), grampo fixador (10), chapas de acrílico transparentes (11) e abertura para coleta dos erodentes (12); pistola de arear (b) - (1) e base do conjunto agitador magnético (c) - base em MDF (2), agitador magnético (4) e conexão da mangueira pneumática (13). | 81 |
| Figura 43 – Equipamento para desgaste erosivo EEEv2, construído em 2018 (UFRGS, Porto Alegre): vista superior (a) - reservatório de plástico (3), fuso (4), barra roscada (5), base | |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| móvel (6), mini morsa (7) e corpo-de-prova (8) e pistola de ar comprimido (b) - (1) e funil de admissão dos erodentes (2). | 82 |
| Figura 44 – Detalhes construtivos do equipamento EEEv2: perfil U em aço 1020 envolvendo o reservatório plástico (a) - (1), adesão do conjunto pistola/ reservatório plástico (b) - (2), referência para adição de erodentes (c) - (3), malha de aço para coleta de areia calibrada pós ensaio (d) - (4), tubo dosador do reservatório secundário (e) - (6) e bocal do dosador (f) - (5). | 84 |
| Figura 45 – Fluxograma da parte experimental da Tese. | 92 |
| Figura 46 – Detalhamento do fluxograma da parte experimental da Tese (Fase 1)..... | 93 |
| Figura 47 – Turbina da COP em outubro de 2017: material removido de uma das pás (a) e pá da turbina após a remoção do material (b). | 94 |
| Figura 48 – Pá da turbina reserva da COP com rugosidade média de 0,626µm. | 96 |
| Figura 49 – Turbina da COP em outubro de 2017: fixação dos componentes para ensaio EIE no lado terra (a) e ensaio de EIE sendo realizado (b)..... | 97 |
| Figura 50 – Detalhamento do fluxograma da parte experimental da Tese (Fase 2)..... | 98 |
| Figura 51 – Alumínio A356.0 T6/AlSi ₇ Mg _{0,3} fornecido pela empresa Latasa do Grupo Recicla BR..... | 98 |
| Figura 52 – Corpos-de-prova utilizados nos ensaios de erosão e nos ensaios de corrosão: lado substrato A356.0 T6/AlSi ₇ Mg _{0,3} (a) e lado com revestimento protetor WC-CoCr (b). ... | 99 |
| Figura 53 – Resultado da análise EDS sobre o primeiro lote de corpos-de-prova recebidos com revestimento protetor WC-CoCr..... | 100 |
| Figura 54 – Detalhamento do fluxograma da parte experimental da Tese (Fase 3)..... | 101 |
| Figura 55 – Detalhamento do fluxograma da parte experimental da Tese (Fase 4)..... | 103 |
| Figura 56 – Amostra já com fio condutor colado na parte posterior sendo adaptada em um suporte para preenchimento com resina epóxi (a) e amostra (cp3 = AA5052 H38 sem desgaste erosivo) já embutida em resina epóxi, lixada e com verniz delimitador de área de contato (b)..... | 104 |
| Figura 57 – Alguns corpos-de-prova prontos para serem utilizados nos ensaios EIE. | 104 |
| Figura 58 – Balão de cinco tubuladuras utilizado nos ensaios de EIE. | 105 |
| Figura 59 – Detalhamento do fluxograma da parte experimental da Tese (Fase 5)..... | 106 |
| Figura 60 – Resultado da análise EDS sobre a amostra da pá da turbina da COP..... | 111 |
| Figura 61 – Resultado da análise metalográfica sobre a amostra da pá da turbina da COP... | 112 |
| Figura 62 – Difratograma obtido da amostra da pá da turbina da COP. | 112 |
| Figura 63 – Diagrama de fases para ligas Al-Mg..... | 113 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 64 – Turbina da COP em outubro de 2017: lado mar apresentando rugosidades menores em relação ao lado terra, seguidas de riscos pela ação de ondas Rayleigt (a) e lado terra com rugosidades heterogêneas e de maiores dimensões (b). | 115 |
| Figura 65 – Dimensões das rugosidades da pá da turbina da COP, algumas ainda com resina de poliéster aplicada na tentativa de preencher e restaurar a superfície lisa. | 115 |
| Figura 66 – Comparação entre os perfis de rugosidades para as diferentes superfícies a) área lisa da pá, b) área com pite e c) pá de reserva. | 116 |
| Figura 67 – Espectros de impedância eletroquímica para duas zonas (zona fortemente atacada por pite e mais limpa) de uma pá da turbina da COP, obtidos no local, em água do mar. | 117 |
| Figura 68 – Circuito elétrico equivalente utilizado na montagem dos espectros de impedância da Figura 69. | 118 |
| Figura 69 – Ajuste do espectro da impedância para a zona pesadamente atacada por pite ao circuito equivalente elétrico proposto. | 119 |
| Figura 70 – Comparação entre a degradação de uma das pás da turbina da COP em alumínio 5052 H38 (a) e as pás do estator em aço inoxidável 316L (b). | 121 |
| Figura 71 – Cicatrizes resultantes dos ensaios erosivos realizados. | 122 |
| Figura 72 – Espectros de impedância do substrato AA5052 H38 (cp3) após imersão em NaCl 3,5% por 1h, 24h e 72h. | 123 |
| Figura 73 – Espectros de impedância do substrato AA5052 H38 com desgaste erosivo (cp4) e sem desgaste erosivo (cp3) após imersão em NaCl 3,5% por 1h. | 124 |
| Figura 74 – Espectros de impedância do substrato AA5052 H38 com desgaste erosivo (cp4) após imersão em NaCl 3,5% por 1h, 24h, 72h e 168h. | 125 |
| Figura 75 – Espectros de impedância do revestimento WC-CoCr (cp1) após imersão em NaCl 3,5% por 1h, 24h, 72h e 168h. | 125 |
| Figura 76 – Espectros de impedância do revestimento WC-CoCr com desgaste erosivo (cp2) e sem desgaste erosivo (cp1) após imersão em NaCl 3,5% por 1h. | 126 |
| Figura 77 – Espectros de impedância do revestimento WC-CoCr com desgaste erosivo (cp2) após imersão em NaCl 3,5% por 1h, 24h, 72h e 168h. | 127 |
| Figura 78 – Espectros de impedância do substrato AA5052 H38 (cp3) e do revestimento WC-CoCr (cp1) após imersão em NaCl 3,5% por 1h. | 128 |
| Figura 79 – Espectros de impedância do substrato AA5052 H38 (cp3) e do revestimento WC-CoCr (cp1) após imersão em NaCl 3,5% por 72h. | 129 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 80 – Espectros de impedância do substrato AA5052 H38 com desgaste erosivo (cp4) e do revestimento WC-CoCr com desgaste erosivo (cp2) após imersão em NaCl 3,5% por 1h. | 130 |
| Figura 81 – Espectros de impedância do substrato AA5052 H38 com desgaste erosivo (cp4) e do revestimento WC-CoCr sem desgaste erosivo (cp1) após imersão em NaCl 3,5% por 1h e 168h respectivamente. | 131 |
| Figura 82 – Corpos-de-prova após suas utilizações nos ensaios de corrosão: WC-CoCr sem desgaste (a), WC-CoCr com desgaste (b), AA5052 H38 sem desgaste (c) e AA5052 H38 com desgaste (d). | 132 |
| Figura 83 – Micrografia (500x) de corpos-de-prova utilizados nos ensaios de corrosão: WC-CoCr sem desgaste (a) e com desgaste (b), ambas com suas respectivas composições químicas. | 133 |
| Figura 84 – Micrografia (500x) de corpos-de-prova utilizados nos ensaios de corrosão: AA5052 H38 sem desgaste (a) e com desgaste (b), ambas com suas respectivas composições químicas. | 134 |
| Figura 85 – Efeito da pressão na perda de volume do substrato em alumínio A356.0 T6/AlSi ₇ Mg _{0,3} e do revestimento WC-CoCr, em condições desgaste erosivo com solução salina e ar comprimido. | 135 |
| Figura 86 – Efeito da distância entre o bico da pistola e o corpo-de-prova na perda de volume do substrato em alumínio A356.0 T6/AlSi ₇ Mg _{0,3} e do revestimento WC-CoCr, em condições de desgaste erosivo com solução salina e ar comprimido. | 136 |
| Figura 87 – Efeito da duração do ensaio na perda de volume do substrato em alumínio A356.0 T6/AlSi ₇ Mg _{0,3} e do revestimento WC-CoCr, em condições de desgaste erosivo com solução salina e ar comprimido. | 137 |
| Figura 88 – Efeito da pressão na perda de volume do substrato em alumínio A356.0 T6/AlSi ₇ Mg _{0,3} em condições de desgaste erosivo com solução salina e ar comprimido (verde), areia calibrada e ar comprimido (azul) e com areia calibrada, solução salina e ar comprimido (cinza). | 138 |
| Figura 89 – Efeito da pressão na perda de volume do revestimento WC-CoCr em condições de desgaste erosivo com solução salina e ar comprimido (verde), areia calibrada e ar comprimido (azul) e com areia calibrada, solução salina e ar comprimido (cinza). | 139 |
| Figura 90 – Efeito da distância entre o bico da pistola e o corpo-de-prova na perda de volume do substrato em alumínio A356.0 T6/AlSi ₇ Mg _{0,3} e do revestimento WC-CoCr em | |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| condições de desgaste erosivo com solução salina, areia calibrada e ar comprimido (tons de cinza) e com areia calibrada e ar comprimido (tons de azul). | 140 |
| Figura 91 – Desgaste do substrato em alumínio A356.0 T6/AlSi ₇ Mg _{0,3} e do revestimento WC-CoCr com ângulos de impacto de 90° (cores escuras) e 45° (cores claras) para diferentes pressões em condições de desgaste erosivo com areia calibrada e ar comprimido. | 142 |
| Figura 92 – Desgaste do substrato em alumínio A356.0 T6/AlSi ₇ Mg _{0,3} com ângulos de impacto de 90° (cores escuras) e 45° (cores claras) para diferentes pressões e distâncias, em condições de desgaste erosivo com areia calibrada e ar comprimido. | 143 |
| Figura 93 – Desgaste do revestimento WC-CoCr com ângulos de impacto de 90° (cores escuras) e 45° (cores claras) para diferentes pressões e distâncias, em condições de desgaste erosivo com areia calibrada e ar comprimido. | 143 |
| Figura 94 – Esquemas ilustrando as geometrias do impacto da erosão de particulado sólido para ângulos de impacto a 45° e 90° realizados neste estudo. Adaptado de (ANAND; HOVIS; CONRAD; SCATTERGOOD, 1987). | 144 |
| Figura 95 – Equipamento de ensaio de granulometria por crivagem (a) e resultado da análise em forma de gráfico (b). | 145 |
| Figura 96 – Cicatrizes resultantes dos ensaios erosivos. | 146 |
| Figura 97 – Micrografia (500x) das cicatrizes resultantes dos ensaios erosivos. | 147 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 1 – Características das turbinas dos OWCs. | 11 |
| Tabela 2 – Cronograma de atividades realizadas na COP..... | 15 |
| Tabela 3 – Característica da turbina da COP. Adaptado de (WEEB, 2005). | 16 |
| Tabela 4 – Mecanismos de degradação por vários componentes tribológicos na energia das ondas OWC. Adaptado de (WOOD; BAHAJ; TURNOCK; WANG <i>et al.</i> , 2010). | 21 |
| Tabela 5 – Características de funcionamento da central de ondas do Pico. | 36 |
| Tabela 6 – Composição química do alumínio A356.0 T6/AlSi7Mg _{0,3} (% massa). (DAVIS; ASSOCIATES; COMMITTEE, 1993). | 43 |
| Tabela 7 – Propriedades mecânicas e ponto de fusão do alumínio A356.0 T6/AlSi7Mg _{0,3} . (DAVIS; ASSOCIATES; COMMITTEE, 1993). | 43 |
| Tabela 8 – Alguns parâmetros importantes dos componentes do tribo-sistema submetido a erosão ou à corrosão. | 64 |
| Tabela 9 – Algumas características obtidas com aplicação de revestimento por HVOF de WC-CoCr..... | 72 |
| Tabela 10 – Relação de condições de trabalho da norma ASTM G76 e do equipamento utilizado. | 86 |
| Tabela 11 – Amostras e suas respectivas áreas utilizadas na realização dos ensaios de EIE. | 103 |
| Tabela 12 – Composição química da liga de alumínio 5052 H38 (% peso). (DAVIS; ASSOCIATES; COMMITTEE, 1993). | 114 |
| Tabela 13 – Propriedades mecânicas e ponto de fusão da liga de alumínio 5052 H38. (DAVIS; ASSOCIATES; COMMITTEE, 1993). | 114 |
| Tabela 14 – Comparativo de valores médios da rugosidade superficial (Ra) das superfícies analisadas. | 117 |
| Tabela 15 – Parâmetros ajustados para os espectros da impedância de zonas pesadamente atacada por pite e mais limpas, usando o circuito equivalente elétrico da Figura 68. | 119 |
| Tabela 16 – Estimativa da profundidade da rugosidade encontrada nas cicatrizes resultantes dos ensaios erosivos. | 147 |
| Tabela 17 – Resumo comparativo de desempenho ao sistema tribológico da COP do material da turbina AA5052 H38 vs revestimento protetor WC-CoCr. | 158 |

LISTA DE ABREVIATURAS

| | |
|---------|---------------------------------------------------------|
| ABAL | Associação Brasileira do Alumínio |
| ASTM | <i>American Society for Testing and Materials</i> |
| AWS | <i>Archimedes Wave Swing</i> |
| BBDB | <i>Backward Bent Duct Buoy</i> |
| CAO | Coluna de Água Oscilante |
| CE | Comissão Europeia |
| CFRP | <i>Carbon Fiber Reinforced Polymer</i> |
| COP | Central de Ondas do Pico |
| DRX | Difratometria de Raio X |
| EDA | Electricidade dos Açores |
| EDP | Energias de Portugal |
| EDS | Micro-Análise de Energia Dispersiva |
| EFACEC | Empresa Fabril de Máquinas Eléctricas |
| EIE | Espectroscopia de Impedância Eletroquímica |
| GFRP | <i>Glass Fiber Reinforced Polymer</i> |
| INETI | Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação |
| IST | Instituto Superior Técnico |
| LIMPET | <i>Land Installed Marine Power Energy Transmitter</i> |
| MEV | Microscópio Eletrónico de Varredura |
| OWC | <i>Oscillating Water Column</i> |
| SEM | <i>Scanning Electron Microscopy</i> |
| SI | Sistema Internacional de Unidades |
| SSG | <i>Seawave Slot-Cone Generator</i> |
| Tapchan | <i>Tapered Channel Wave Power Device</i> |
| WavEC | <i>Wave Energy Centre</i> |
| WEC | <i>Wave Energy Converter</i> |
| WMO | <i>World Meteorological Organization</i> |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | | |
|--------------------------|---------------------------------------------------------------|-------------------------|
| A | Área | m^2 |
| $CPE_{\text{óxido-}Y_o}$ | Admitância do elemento fase constante do óxido | $\mu F s^{n-1} cm^{-2}$ |
| $CPE_{\text{pite-}Y_o}$ | Admitância do elemento fase constante de dupla camada no pite | $\mu F s^{n-1} cm^{-2}$ |
| d | Densidade de potência | kW/m^2 |
| E | Energia | kWh |
| $E.F.F$ | Energia de Falha de Empilhamento | mJ/m^{-2} |
| f | Frequência | Hz |
| H | Dureza | HV ou kgf/mm |
| P | Pressão | Pa ou bar |
| R'_s | Resistência adicional da solução dentro do pite | Ωcm^2 |
| R_a | Rugosidade média | μm |
| R_{pite} | Resistência da transferência de carga no pite | Ωcm^2 |
| R_s | Resistência da solução | Ωcm^2 |
| R_z | Rugosidade média | μm |
| T | Temperatura | $^{\circ}C$ |
| V | Volume | m^3 |
| W_s-P | Parâmetros da impedância de Warburg generalizada | |
| W_s-R | Parâmetros da impedância de Warburg generalizada | Ωcm^2 |
| W_s-T | Parâmetros da impedância de Warburg generalizada | s |
| Z | Impedância | Ωcm^2 |
| v | Velocidade escalar | m/s |
| Φ | Diferença de fase | $^{\circ}$ |
| ω | Velocidade angular | RPM |
| \bar{P} | Potência da onda | kW/m |
| H_s | Altura da onda | m |
| T_e | Período da onda | s |
| ω | Frequência angular | Rad/s |

Capítulo 1

Introdução

1 INTRODUÇÃO

1.1 DA ENERGIA DAS ONDAS

Em setembro de 2015, com a aprovação da Agenda 2030, o mundo assumiu o compromisso de buscar os objetivos universais traçados para o desenvolvimento sustentável, sendo esses particularmente relevantes no domínio da geração de energia elétrica e posteriormente o acordo de Paris sobre mudança do clima apenas reforçou essa necessidade (NATIONS, 2015). De acordo com o relatório “Progresso em direção da energia sustentável” de 2015, cerca de 1,1 bilhão de pessoas pelo mundo ainda vivem sem eletricidade e quase 3 bilhões ainda cozinham usando combustíveis poluentes, como querosene, madeira, carvão vegetal e esterco (BANK, 2015). Enquanto as formas convencionais de produção de energia elétrica contam com limitações de recursos e ocasionam sérias ameaças ao meio ambiente, as fontes renováveis de energia são capazes de manterem-se disponíveis durante um longo prazo, contando com recursos que se regeneram ou que se mantêm ativos permanentemente.

Atualmente, é mais comum associar energias renováveis a fontes solar, eólica e hídrica, por se tratarem de tecnologias altamente desenvolvidas, promovidas, popularizadas e com maior sucesso de implementação no mercado. No entanto, existe uma outra fonte com tremendo potencial que ainda é pouco aproveitada: aquela oriunda do mar, a qual, por ser extremamente energética, tem também um caráter destrutivo, o que a torna, por vezes, difícil de dominar.

A magnitude da energia incidente das ondas, ao longo de 30000 km das costas do Oceano Pacífico, por exemplo, tem sido estimada em cerca de 10 TWh por ano (TORRESI; CAMPOREALE; STRIPPOLI; PASCAZIO, 2008). Esse valor corresponde a cerca de 40% do consumo de energia elétrica do mundo registrado no ano 2018 que foi de aproximadamente 25 TWh (AGENCY, 2020). O recurso dessa energia também é mais confiável do que a maioria das energias renováveis. Dependendo do local, pode ficar disponível até 90% do tempo, enquanto a solar e a eólica possuem disponibilidade entre 20% a 30% apenas (TAYLOR, 2001). No entanto, instalações para essa finalidade são difíceis de serem planejadas com precisão para uma vida útil em torno de 50 anos, em razão da imprevisibilidade do comportamento do mar, ocasionando como resultado a subestimação ou a superestimação das cargas de projeto. Quando subestimadas, a destruição total ou parcial das instalações é de se esperar. Já quando superestimadas, os elevados custos de construção induzem um alto custo de geração de potência, tornando a tecnologia não competitiva,

fazendo com que as exigências técnicas e físicas necessárias para sobreviver e suportar tais condições ao longo de largos períodos de tempo tornem a viabilidade econômica difícil de ser alcançada (CLÉMENT; MCCULLEN; FALCÃO; FIORENTINO *et al.*, 2002).

A tecnologia de energia das ondas ainda está em fase de desenvolvimento, tendo sido implantados, até o momento, apenas alguns protótipos de escala completa, apesar do significativo investimento de recursos financeiros e humanos que foram direcionados nas últimas décadas. As principais razões para essa lentidão são:

- a) as forças excepcionalmente elevadas que podem ser exercidas pela quebra das ondas;
- b) as dificuldades de se alcançar amarrações robustas e economicamente viáveis;
- c) as dificuldades em manter o isolamento adequado entre componentes elétricos e a água do mar;
- d) a durabilidade do material exposto ao ambiente corrosivo em que os Conversores de Energia das Ondas (WEC – *Wave Energy Converter*) estão instalados.

Tal como acontece com muitas fontes de energias renováveis, como, por exemplo, a solar e a eólica, a disponibilidade de recursos de energia das ondas em um único local varia com o tempo. Para uma rede elétrica incorporar a energia das ondas é preciso ter certa capacidade de reserva para satisfazer qualquer queda de energia devido ao seu funcionamento intermitente. Essa capacidade de reserva pode ser proveniente de:

- a) tradicionais usinas de energia em modo de espera;
- b) armazenamento de energia, tais como baterias ou armazenamento de água bombeada (energia hídrica usada de forma planejada);
- c) regime de trocas de energia, tais como com outras ou com diversas fontes renováveis de energia simultâneas.

Um portfólio de diferentes fontes de energias renováveis pode ajudar a garantir a capacidade de reserva porque a intensidade, a frequência e a fase não são iguais entre diferentes fontes, ou seja, energia solar, eólica, hídrica, das marés e das ondas ocorrem em momentos diferentes, com intensidades diferentes. Se as fontes de energias renováveis forem suficientemente variadas e com capacidade similar de contribuição, a qualquer momento um certo nível de base de suprimento de energia estará disponível, e esse nível poderá então ser considerado como capacidade de reserva.

A energia das ondas é considerada uma forma concentrada da energia solar (fonte primária de energia), pois é essa que, pelo aquecimento desigual da superfície terrestre, é responsável pelos ventos. O vento flui ao longo da superfície do mar criando as ondas (fonte secundária de energia). Uma vez criadas, as ondas podem viajar milhares de quilômetros no alto mar praticamente sem perdas de energia (CRUZ; SARMENTO, 2004).

Uma onda tem energia armazenada na forma de energia cinética (movimento da água) e potencial gravitacional (na variação da altura da onda em relação ao nível médio do mar), sendo a sua potência ($\bar{P}_{onda} = 0,490 H_s^2 T_e$, em que \bar{P} é a potência, H_s a altura significativa e T_e o período de energia) proporcional ao seu período e ao quadrado de sua altura e é usualmente referida em kW por metro de frente de onda incidente (BROOKE, 2003). A Figura 1 mostra a média anual da potência de onda disponível globalmente, sendo possível verificar que o hemisfério sul tem, notoriamente, maiores áreas com níveis de potência elevados.

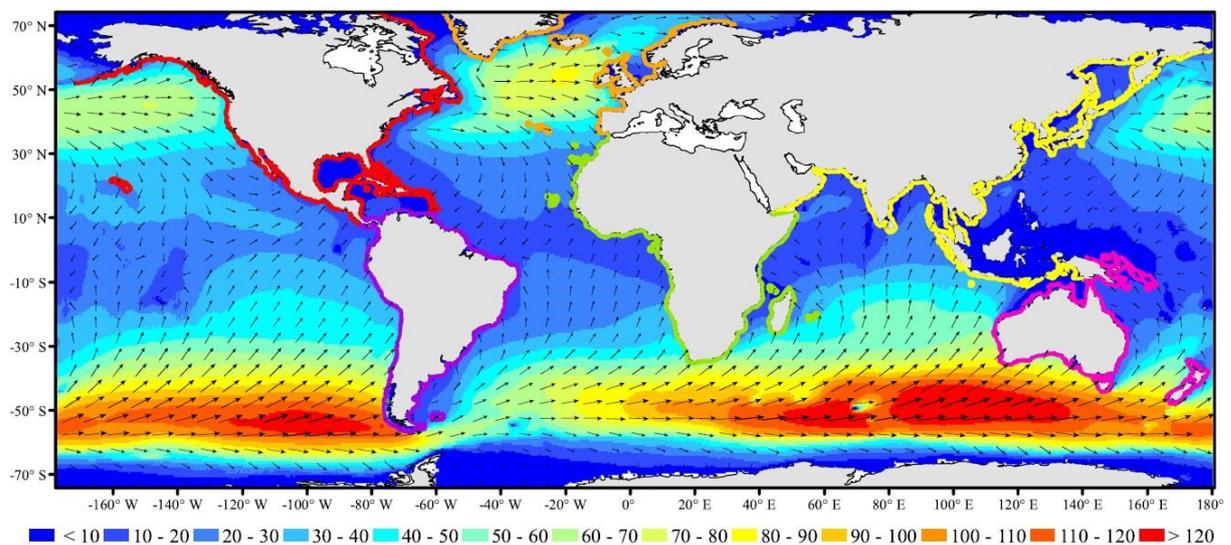


Figura 1 – Estimativa das potências de onda média globais em kW/m e média anual das melhores direções. (GUNN; STOCK-WILLIAMS, 2012).

O maior potencial de energia das ondas existe onde estão os ventos mais fortes, nas latitudes temperadas entre 40° e 60° norte e sul, sobre os limites orientais dos oceanos (PELC; FUJITA, 2002). É importante notar também que o hemisfério sul não só possui, globalmente, mais zonas com níveis maiores de potência, como também as razões entre a potência disponível nos meses mais e menos energéticos são menores que no hemisfério norte, de onde

se conclui que a potência disponível sofre menos variação ao longo do ano. Sendo assim, a produção elétrica será mais constante. A energia das ondas é muito adequada para países com uma vasta linha costeira e com ondas altas se aproximando da costa (ZHANG; LI; LIN, 2009).

Sobre o aspecto ambiental, a geração de energia das ondas em pequena escala tem um provável impacto ambiental mínimo. Já as consideradas de grande capacidade, devem contemplar no seu planejamento de estudo da localização não só o potencial para gerar energia, mas também sua interação com o ecossistema existente e seus processos ecológicos naturais, pois alterações na superfície do mar e das correntes marítimas podem reduzir potencialmente o abastecimento alimentar às populações bentônicas e prejudicar as desovas de peixes. Por outro lado, em locais com mares muito agitados, a estrutura instalada pode atuar como amortecedor de onda em resposta às ondas poderosas, acalmando o mar e melhorando a vida marinha, fornecendo estrutura na forma de recifes artificiais (PELC; FUJITA, 2002).

Em 2010, o *Electric Power Research Institute*, em um documento produzido para o Departamento de Energia do Governo Australiano, apresentou uma curva de *Grubb* para vários tipos de energias renováveis existentes, como pode ser visto na Figura 2. Naquele momento, o relatório indicava que a energia das ondas se encontrava em fase de desenvolvimento, sendo que já se passaram 10 anos e o cenário pouco mudou.

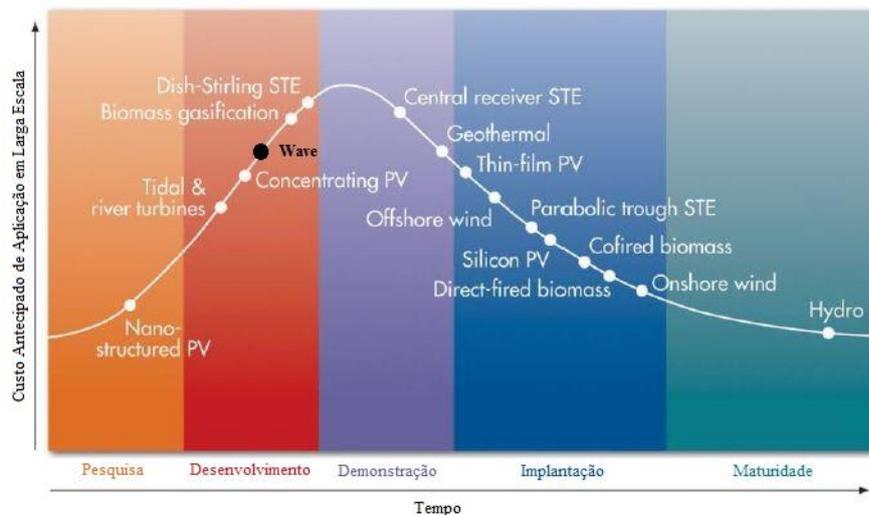


Figura 2 – Curva de *Grubb* para diferentes tecnologias de energias renováveis. Adaptado de (BEDILION; BOORAS; MCGOWIN; PHILLIPS *et al.*, 2010).

Apesar dos atuais desafios para a geração de energia das ondas, o tema é instigante, sendo perseguido e motivado em parte pela consistência e previsibilidade do recurso onda em

comparação com algumas outras fontes de energias renováveis e o enorme potencial de energia que as ondas apresentam. Estima-se que, a nível global, o recurso de energia das ondas corresponda a uma potência de aproximadamente 2 TW (CRUZ, 2008). Entretanto, apenas poucos projetos pilotos estão instalados ao redor do mundo para a extração de energia das ondas. Mesmo assim, é provável que a energia das ondas vai se tornar, pelo menos, tão importante como a eólica, solar e a hídrica (CALLAWAY, 2007). A alta densidade de potência concentrada nas ondas (uma média global de cerca de 2,5 kW/m² em relação ao vento 0,4 kW/m² e solar 0,15 kW/m²) possibilita que uma grande quantidade de energia seja extraída de uma área relativamente pequena, o que é importante em um mundo cada vez mais populoso.

Embora a primeira patente conhecida tenha sido gravada em 1799, não seria errado afirmar que a extensa pesquisa sobre a ideia de extração de energia das ondas do mar foi iniciada pela crise do petróleo no ano de 1973 (FALCÃO, 2004). A fim de explorar os benefícios de tal fonte de energia renovável, uma grande variedade de dispositivos, baseados em diferentes métodos de extração de energia têm sido propostos, mas só alguns foram realmente instalados (CLÉMENT; MCCULLEN; FALCÃO; FIORENTINO *et al.*, 2002).

As formas em que a energia pode ser absorvida das ondas dependem, por exemplo, da profundidade da água e da localização (costa, perto de terra, no mar). Um dos métodos mais usuais para se classificar os conversores de energia das ondas baseia-se principalmente no princípio de funcionamento. Através dessa classificação pode-se identificar 3 grandes grupos de conversores, sendo que em cada um desses grupos ainda se encontra diferenças construtivas entre eles: 1) do tipo coluna de água oscilante (com turbina de ar), 2) do tipo corpos flutuantes, com motor hidráulico, com turbina hidráulica e gerador elétrico linear (*Oscillating Body Systems*) e 3) do tipo elevação, com turbina hidráulica de baixa queda (*Overtopping Converters*). Os exemplos mostrados a seguir não são destinados a formar uma lista exaustiva e foram escolhidos entre os projetos que chegaram à fase de protótipo ou, pelo menos, foram objeto de esforço de desenvolvimento extensivo.

Os conversores do tipo corpos flutuantes, normalmente dispositivos no mar (*offshore*) são basicamente corpos oscilantes, flutuando ou (mais raramente) totalmente submersos. Eles exploram os regimes de ondas mais poderosas disponíveis em águas profundas (tipicamente mais de 40 m de profundidade de água). Tais conversores, em geral, são mais complexos em comparação com os do tipo coluna de água oscilante por exemplo. Isso, justamente por problemas adicionais associados à sua amarração, ao acesso a manutenções, a necessidade de

longos percursos de cabos elétricos subaquáticos etc. o que tem dificultado seu desenvolvimento e apenas recentemente alguns sistemas atingiram a fase de demonstração em larga escala como por exemplo: AquaBuoy, IPS Buoy, FO3, Wavebob, PowerBuoy, Pelamis, PS Frog, SEAREV, AWS, WaveRoller, Oyster.

Já os conversores do tipo elevação, capturam a água que está perto da crista de onda e introduzem na, ao transbordar, em um reservatório onde é armazenada a um nível superior ao nível ao qual uma turbina hidráulica é instalada. Como resultado, a energia das ondas é gradualmente transformada em energia potencial no reservatório. A principal função do reservatório é assegurar um fornecimento de água estável para a turbina. Alguns protótipos foram o TAPCHAN, SSG, Wave Dragon.

De fato, o aproveitamento da energia das ondas precisa ainda vencer muitos desafios, como é o caso da força destrutiva e imprevisível do mar e os elevados custos associados à instalação e manutenção que foram subestimados no passado. Tais dificuldades, dentre outras, fizeram com que diferentes projetos não cumprissem os objetivos a que se propuseram, além de possuírem orçamentos inferiores aos que realmente eram necessários. Ademais, o fato de serem testadas diferentes tecnologias em simultâneo, evidencia que ainda não existe um consenso sobre qual é a tecnologia mais promissora, o que origina, frequentemente, a distribuição dos fundos disponíveis em diferentes conceitos, dificultando assim a convergência de conhecimento e experiência.

A Coluna de Água Oscilante (OWC – *Oscillating Water Column*), cujo desenvolvimento se iniciou com Yoshio Masuda, é um dos muitos tipos de conversores de energia de onda existentes, sendo o dispositivo de maior sucesso e mais extensivamente estudado para extrair energia de ondas do mar (FALCÃO; HENRIQUES, 2016). A principal vantagem do OWC em relação à maioria dos outros conversores de energia das ondas é sua simplicidade: a única parte móvel do mecanismo de conversão de energia é uma turbina, localizada acima do nível da água, girando a uma velocidade relativamente alta e conectada diretamente a um gerador elétrico convencional (FALCÃO, 2015; FALCÃO; HENRIQUES, 2016).

Os OWCs consistem basicamente em estruturas ocas, fixas ou flutuantes, com uma abertura na sua parte submersa. A oscilação da superfície livre no interior da estrutura oca, devido a ação das ondas incidentes, provoca alternadamente uma compressão e descompressão do ar, provocando um fluxo de ar bidirecional através de uma turbina que o

comunica com a atmosfera. A turbina por sua vez está acoplada a um gerador, que é responsável pela produção de energia elétrica. A Figura 3 ilustra a disposição da estrutura e o funcionamento de um OWC.

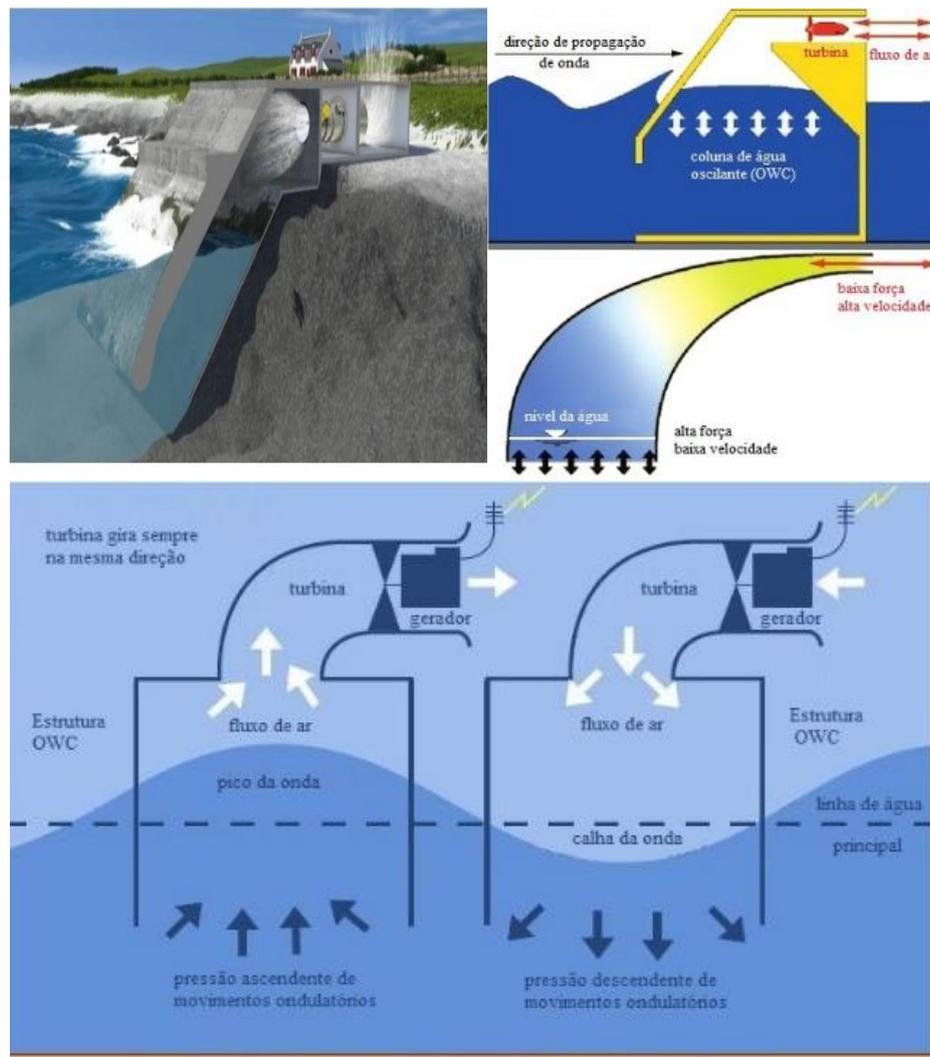


Figura 3 – OWC: projeção em vista de corte e esquema de funcionamento. Adaptado de (SEED; LANGSTON, 2010), (WENGENMAYR; BÜHRKE, 2011) e (DRESSER-RAND, 2015).

O processo de geração de eletricidade no OWC segue duas fases: a primeira é quando uma onda entra na estrutura (a subida da onda) e o ar que se encontra dentro dela é forçado a passar por uma turbina, como consequência direta do aumento de pressão na câmara de ar. A subida da onda também é chamada de empolamento, que acontece quando a fase ascendente da onda assume velocidade superior à da fase descendente, devido ao decréscimo da profundidade do mar. Esse efeito tem especial importância em dispositivos de aproveitamento da energia das ondas que se encontram instalados junto à costa marítima, uma vez que a fase ascendente da onda possui um maior gradiente energético que a fase descendente.

Já a segunda fase é quando a onda regressa ao mar (a descida da onda) e o ar passa novamente na turbina, desta vez no sentido inverso, dada a pressão inferior no interior da câmara de ar. Para isso, é comum utilizar-se a expressão lado mar (compressão do ar associado à subida da onda) e lado terra (sucção do ar externo devido ao declínio da onda). A passagem de ar contínua movimentada a turbina acoplada a um gerador, que é o responsável pela produção de energia elétrica.

As Figuras 4 e 5 apresentam alguns dos principais protótipos instalados em diversas localidades, bem como as suas formas construtivas e as suas capacidades de geração de energia elétrica.

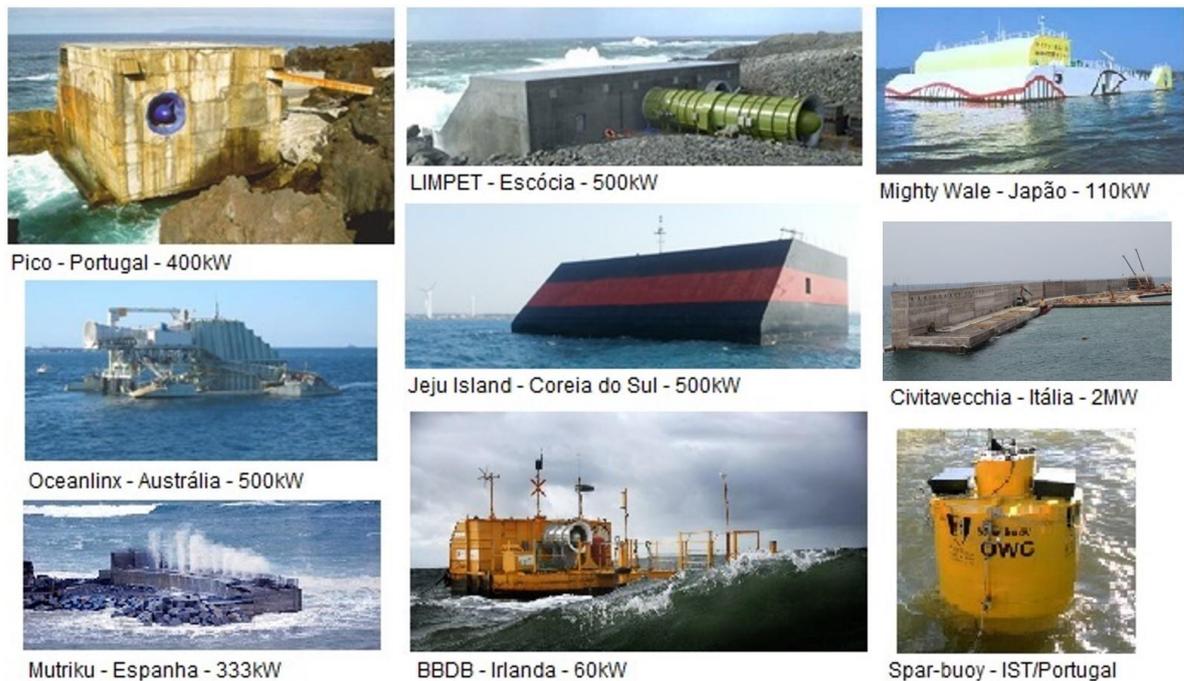


Figura 4 – Fotos de OWCs instalados ao redor do mundo. Adaptado de (FALCÃO, 2015; FALCÃO; HENRIQUES, 2016).

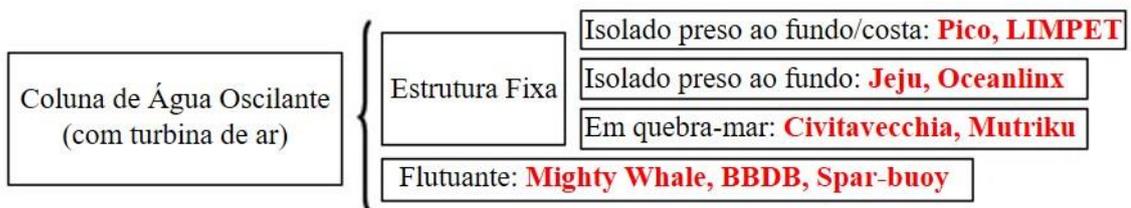


Figura 5 – Esquema de OWCs instalados ao redor do mundo. Adaptado de (FALCÃO, 2010).

O desempenho do OWC depende da eficiência de absorção de energia, que está diretamente relacionado com a diferença de pressão entre os lados da turbina, bem como o rendimento da turbina através de suas características de partida e de funcionamento.

Para modelar o sistema OWC, são consideradas as seguintes condições de transferência de energia:

- a) a relação entre a potência das ondas incidentes por unidade de comprimento de crista e a potência absorvida (hidrodinâmica);
- b) a relação entre a potência associada a oscilação da superfície livre da água no interior da câmara e a potência pneumática disponível pela turbina (termodinâmica);
- c) o desempenho aerodinâmico da turbina caracterizado pela fração da potência pneumática disponível que é convertida em potência útil;
- d) as perdas de energia mecânica da turbina através de fricções de rolamentos;
- e) a relação entre a potência mecânica no veio da turbina e a potência elétrica à saída do gerador;
- f) a transferência da entrega da energia elétrica para a rede de distribuição e quaisquer perdas elétricas nesse processo.

As turbinas dos conversores OWCs variam de acordo com sua forma construtiva e as mais comuns são as que foram utilizadas em centrais pilotos, algumas delas já referenciadas neste trabalho e que se encontram relacionadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Características das turbinas dos OWCs.

| Turbinas | Wells s/ estatores | Wells c/ estatores fixos (WTGV) | Wells contra rotação | Wells Biplano | Ação ou Impulso c/ estatores fixos (IFGV) | Ação ou Impulso c/ estatores variáveis (ISGV) | Deniss-Auld | |
|------------------|--------------------|---------------------------------|----------------------|---------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------|------------------|
| Centrais Pilotos | <i>Vizhinjam</i> | <i>Mighty Whale</i> | <i>Pico</i> | <i>LIMPET</i> | <i>Mutriku</i> | <i>Jeju Island</i> | <i>BBDB</i> | <i>Oceanlinx</i> |
| Diâmetro (m) | 2 | 1,7 | 2,3 | 2,6 | 0,75 | 1,8 | 0,677 | 1,6 |
| Velocidade (rpm) | 1000 | 900-2000 | 750-1500 | 1050 | 3000 | 450 | 300-1300 | 500 |
| Material das pás | não encontrado | Alumínio | Alumínio | Alumínio | Alumínio | Aço Inoxidável | não encontrado | Aço Inoxidável |

Em Portugal, a investigação sobre energia das ondas começou em 1978, no Instituto Superior Técnico (IST), em Lisboa, a que se juntou, em 1983, o Instituto Nacional de

Engenharia, Tecnologia e Inovação (INETI). Após anos de estudo e planejamento, em 1999 a construção do conversor de energia das ondas do tipo coluna de água oscilante na ilha do Pico, nos Açores, foi concluída.

Portugal tem uma extensão litorânea de 2147 km, sendo que a maior concentração, entre 30 e 40 kW/m, está na costa ocidental do continente e nas costas noroeste do arquipélago dos Açores. Estima-se que o recurso total de energia das ondas em Portugal continental é de cerca de 10 GW (MOLLISON; PONTES, 1992). Especificamente neste âmbito, a Central de Ondas do Pico (COP) foi um dos poucos OWCs no mundo operando à escala real e conectados à rede energética nacional que extraiu energia a partir das ondas desde os anos 1999 até 2018; por esse motivo tem sido estudada extensivamente, o que a tornou a mais relevante usina de ondas OWC do mundo.

1.2 DA CENTRAL DE ONDAS DA ILHA DO PICO

A COP é uma planta piloto do tipo OWC, sendo a energia das ondas extraída por uma turbina do tipo Wells (mantém o sentido de rotação independentemente da direção do fluxo de ar que a atravessa), que está diretamente acoplada a um gerador assíncrono. A estrutura em concreto armado foi construída no litoral da costa norte da ilha do Pico, no arquipélago dos Açores, nas coordenadas globais de N (38.560046), E (-28.441899). O local foi escolhido por causa do elevado potencial de energia das ondas (excluindo verão), pelas águas profundas próximas ao litoral e em razão da disponibilidade de conexão com um transformador de rede de alta tensão próximo à COP, sendo uma das poucas deste tipo no mundo a produzir energia elétrica para a rede de distribuição local.

A construção, iniciada em 1995 e concluída em 1999, foi financiada pela Comissão Europeia (programa JOULE), tendo o consórcio incluído as companhias portuguesas EDP, EDA, Profabril e EFACEC, e ainda o IST, o University College Cork (Irlanda) e a Queens University Belfast (Reino Unido). Os estudos de implementação tiveram início em 1986, nomeadamente com a identificação de possíveis locais de instalação e com a aquisição de dados acerca das características do mar na ilha do Pico. No âmbito desse processo de identificação, a atual localização registrou uma potência de onda incidente média anual de 13,4 kW/m (NEUMANN; BRITO E MELO; LE CROM, 2001b).

Os objetivos principais do projeto original da COP foram os seguintes:

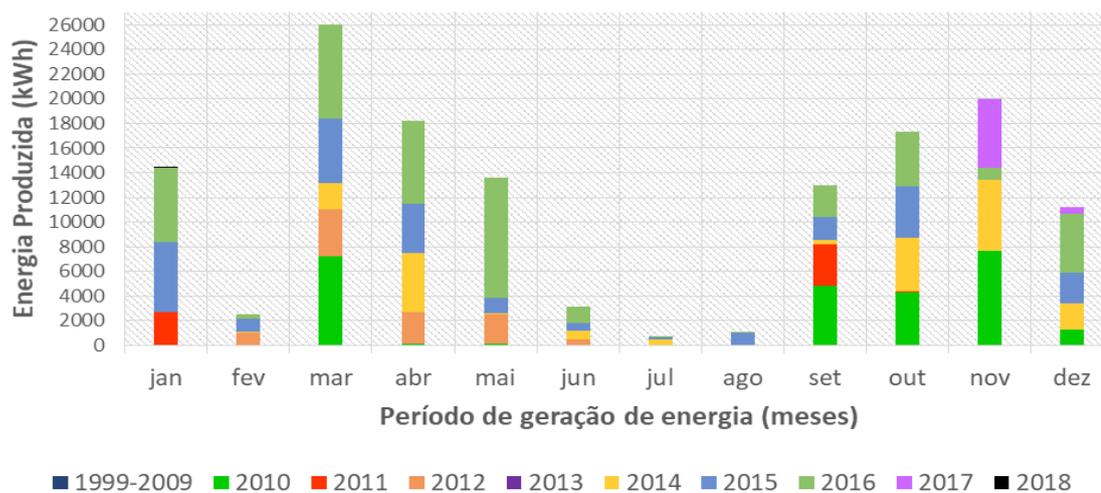
- a) ser a primeira usina OWC projetada para fornecer energia elétrica de forma permanente durante a vida útil da central (estimada em 25 anos);
- b) demonstrar a viabilidade técnica do uso da energia de ondas do tipo OWC para geração de eletricidade, convertendo a usina em escala comercial;
- c) fornecer uma instalação de teste para diferentes partidas de equipamentos;
- d) fornecer meios para avaliar e validar a metodologia de projeto global e a caracterização teórica;
- e) avaliar a viabilidade econômica de usinas OWC para sistemas isolados de pequeno porte;
- f) ganhar experiência na concepção, construção e operação nas condições mais controladas de um dispositivo montado na linha de costa antes da implantação de dispositivos sobre o mar (offshore).

Desde 2003 a COP foi administrada pela WavEC (*Wave Energy Centre*), que iniciou um trabalho de recuperação da central e desde então é a responsável pelo seu funcionamento, tendo disponibilizado diversos materiais para contribuir com este trabalho, tais como: registros de manutenções, relatórios de operações, imagens, vídeos, bem como o acesso a central do Pico para realização de análises no próprio local. A Figura 6 apresenta algumas imagens da COP.



Figura 6 – COP vista de vários ângulos: vista lado terra (a), vista lado mar (b) e em um dia de mar agitado (c).

A turbina utilizada na COP foi projetada pelo IST e fornecida pela empresa escocesa WaveGen. Foi instalada em 1999. A história de quase 20 anos da COP apresentou uma peculiaridade no quesito geração de energia elétrica, pois em seus primeiros 10 anos produziu pouco e somente em seus últimos 10 anos é que ocorreu produção de forma efetiva, totalizando até abril de 2018, um valor aproximado de 160000 horas em ambiente atmosférico marinho. Desse total, estima-se aproximadamente 6650 horas de funcionamento e uma produção de energia elétrica de 141,2 MWh, resultante da sua operação nos anos de 2010 a 2018, conforme Figura 7 e Tabela 2.



A Figura 7 evidencia a sazonalidade de operação da COP nos diferentes períodos do ano, considerando que o verão no hemisfério norte (junho a agosto) possui mares mais calmos, bem como os extensos períodos em que a COP não operou devido a diversos problemas técnicos, principalmente nos primeiros 10 anos. Na Tabela 2 há um breve histórico dos quase 20 anos de funcionamento da COP.

Tabela 2 – Cronograma de atividades realizadas na COP.

| Ano | Atividades | Energia Produzida (kWh) | Tempo em Funcionamento (h) |
|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|----------------------------|
| 1999-2008 | Funcionamento interno para identificação e resolução de problemas de ordens técnicas | 0 | 0 |
| 2009 | Reforço estrutural do grupo turbo-gerador, ativação do modo automático e teste de 100 horas | 0 | 100 |
| 2010 | Medições de ondas diretas, início de fornecimento de energia para rede local e mal funcionamento do gerador identificado | 25571 | 1446,5 |
| 2011 | Problema no estator lado terra e remoção em definitivo do mesmo | 6146 | 312,9 |
| 2012 | Implementação da lei de controle da válvula de alívio, identificação de fissuras nas pás da turbina de ar e lançamento da campanha “Pico Donativos” | 10144 | 497 |
| 2013 | Controle em tempo real da válvula de alívio com recurso a redes neurais | 3 | 1 |
| 2014 | Encerramento da campanha “Pico Donativos” e uso de tinta especial de baixa condutividade nos componentes do gerador | 20888 | 808,15 |
| 2015 | Início do processo de encerramento da COP | 27442 | 1087,5 |
| 2016 | COP operando sob responsabilidade do Eng. Victor Wolf Etienne Winands | 44833 | 1951 |
| 2017 | COP operando sob responsabilidade do Eng. Victor Wolf Etienne Winands | 6099 | 440 |
| 2018 | COP operando sob responsabilidade do Eng. Victor Wolf Etienne Winands e encerramento das atividades em Abril | 69 | 10 |

Cabe destacar que em 17 de abril de 2018 ocorreu um colapso parcial da estrutura de fundação da COP decorrente de uma forte tempestade marítima (Figura 8), o que resultou no encerramento das suas atividades.



Figura 8 – A COP após o colapso parcial da estrutura de fundação que ocorreu em 17 de abril de 2018.

A turbina da COP tem um diâmetro de 2,3 metros, um rotor com 8 pás de alumínio e 2 estatores em aço inoxidável de pás fixas com 59 pás cada. A potência instalada é de aproximadamente 400 kW, quando gira à velocidade máxima (NEUMANN; BRITO E MELO; LE CROM, 2001b). A câmara de pressão possui 1440 m³ de volume e tem em si instalada uma válvula de alívio que permite adequar a pressão dentro da câmara às condições do mar (SARMENTO, 2010). A estrutura da central tem ainda capacidade para albergar uma segunda turbina, apesar dessa nunca ter sido instalada (NEUMANN; LE CROM, 2011). A Tabela 3 apresenta as características da turbina da COP. A Figura 9 mostra imagens da turbina à época da instalação.

Tabela 3 – Característica da turbina da COP. Adaptado de (WEEB, 2005).

| | |
|----------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Turbina | Wells |
| Diâmetro | 2,3 m |
| Velocidade nominal de operação | 750-1500 rpm |
| Arranjo | Axial na Horizontal |
| Forma da pá | 3D simétrico NACA 0015 na base e NACA 0012 na ponta |
| Número de pás | 8 |
| Corda da pá | 375 mm |
| Relação de diâmetros externo e interno | 0,59 |



Figura 9 – Imagens datadas de 1999: conjunto gerador turbina (a) e turbina (b).

A turbina é o elemento mais crítico da cadeia de conversão de energia de um OWC-WEC. Essas turbinas encontram-se em condições de corrosão particularmente graves por estarem instaladas em zona de respingo, na atmosfera imediatamente acima do mar, e, às vezes, com muita umidade, carregada de sal e de ar quente em dias ensolarados, razão pela qual operar a turbina dentro um OWC nessas condições pode ser ainda mais corrosivo do que o normal ambiente marinho, devendo também ser considerado o possível efeito de gotículas de condensação ou de salpicos de água em condições severas que incidem nas pás de turbina em alta velocidade (HUDSON; PHILLIPS; WILKINS, 1980). De fato, o fluxo através da turbina é alternado, é aleatório e altamente variável sobre várias escalas de tempo, oscilando de alguns segundos a variações sazonais (FALCÃO, 2010). Por essas condições, a eficiência e o tempo de vida médio de uma turbina em um OWC é substancialmente menor do que de turbinas de água, vapor, gás, ou vento que trabalham em condições quase constantes (FALCÃO, 2010).

1.3 DO DESGASTE ACENTUADO OCORRIDO NA TURBINA DA COP

O jato de ar que entra para o duto da turbina, proveniente da câmara de ar, contém um *spray* de água, por efeito arraste, como pode ser visto nas Figuras 10 e 11. O impacto das gotas de água do mar com elevada velocidade relativa pode produzir erosão severa nas pás da turbina (PAIXÃO CONDE; GATO, 2008). Inclusive, por vezes, fragmentos que se desprenderam de rochas vulcânicas maiores pela ação dos ventos, das ondas ou pela própria ação do homem podem ainda ser arrastados contra a turbina, e, em eventos extremos, também

restos de fluxos do meio marinho, pois a maioria dos objetos sintéticos descartados são semissubmersíveis, podendo danificar as pontas das pás da turbina (CHEN; LAM, 2015). O impacto causado pode remover o filme fino e aderente de óxidos (5 a 100 Å) formado espontaneamente, que protege o metal de um ataque posterior da superfície da pá, bem como pode expor o material para início de processos de corrosão, trazendo incerteza para a confiabilidade das turbinas. Dependendo do tipo de erodente e da força do impacto, microfissuras podem ser criadas, servindo de caminho para propagação de corrosão.

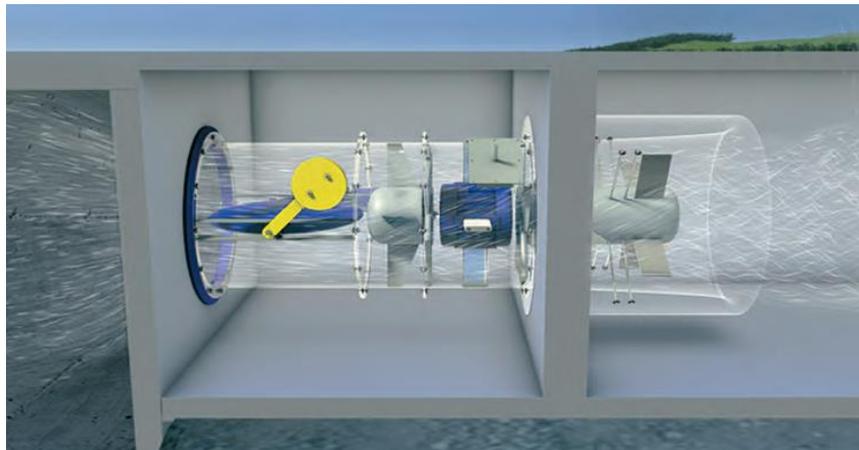


Figura 10 – Projeção do jato de ar com arraste de água e microparticulados. (WAVEGEN).



Figura 11 – Fotografia tirada digitalmente de um vídeo do funcionamento da COP para mostrar o *spray* de água que passou pela turbina e chegou à atmosfera. (WAVEC).

No caso da COP, os impactos entre as pás do rotor da turbina e as gotas de água salina, por vezes com microparticulados, que chegaram pelo duto da turbina por meio do fluxo de ar, criaram milhares de pequenas fissuras nas superfícies das pás da turbina, havendo a cristalização do sal e a dissolução de ciclos de corrosão que expandiram estas fissuras, sendo alguns de tamanho considerável.

Em 2012, uma resina de poliéster foi aplicada nas pás da turbina na tentativa de preencher as crateras e restaurar a superfície lisa, mas isso lentamente separou-se e não durou muito tempo. Os danos nas pás da turbina são mostrados na Figura 12, onde um ensaio não destrutivo por aplicação de líquido penetrante (corante de identificação de fissura) é usado para destacar o desgaste ocorrido. A rugosidade e a não uniformidade da superfície da pá da turbina alteram as características aerodinâmicas, prejudicando sua eficiência. Outro problema, do ponto de vista ambiental, é o elevado nível de ruído vindo da saída de ar da turbina nos picos de maior velocidade, intensificado pela perda de massa nas pás da turbina, o que, provavelmente, ocasiona possível desbalanceamento e, conseqüentemente, maior vibração, aumentando o ruído, o que impede que esses conversores sejam localizados nas proximidades de áreas habitadas (BORRÁS-FORMOSO; FERREIRO-GARCIA; MIGUEL-CATOIRA; MIGUÉLEZ-POSE, 2015).



Figura 12 – Fotografias tiradas em 2011 e 2012 mostrando o desgaste nas pás da turbina. Cortesia do WavEC.

A Figura 13 apresenta imagens das pás da turbina em outubro de 2017, onde é possível notar não só as fissuras na superfície como também rugosidades que se formaram, bem como a perda de material nas bordas das pás.



Figura 13 – Imagens datadas de 2017 mostrando o desgaste nas pás da turbina (a), lado terra com fissuras, cicatrizes de erosão nas bordas de ataque (b) e lado mar com cicatrizes similares ao lado terra (c).

As imperfeições na superfície das pás e a perda de material nas bordas evidenciam o desgaste erosivo, e, havendo desgaste mecânico em conjunto com desgaste químico torna-se

assim possível a ocorrência de tribocorrosão nas pás da turbina quando de sua operação, definida como uma degradação resultante de uma combinação de processos tribológicos e eletroquímicos. A taxa de degradação do material se expressa como uma perda no desempenho ou uma perda no material, sendo muitas vezes maior do que a soma das taxas de corrosão e de desgaste erosivo agindo separadamente. A sinergia de corrosão e de erosão é ainda mal compreendida devido à complexidade do problema e à falta de técnicas experimentais adequadas, embora o número de trabalhos de tribocorrosão publicados em revistas científicas ou apresentados em congressos tenha aumentado significativamente nos últimos anos. A seleção de materiais para uso em sistemas com evidência de tribocorrosão é extremamente desafiadora e baseia-se na otimização do desempenho contra os processos de degradação combinada (WOOD, 2006). Na indústria, a seleção do material para resistir ao desgaste corrosivo é baseada principalmente na experiência e testes de tentativa e erro (MERL; PANJAN; CEKADA; GSELMAN *et al.*, 2013).

Dessa forma, é possível esperar que a turbina dos conversores de energia das ondas do tipo coluna de água oscilante possui na erosão um de seus mecanismos de desgaste. A Tabela 4 resume os mecanismos de desgaste que possivelmente se manifestam nas pás da turbina desse OWCs.

Tabela 4 – Mecanismos de degradação por vários componentes tribológicos na energia das ondas OWC. Adaptado de (WOOD; BAHAJ; TURNOCK; WANG *et al.*, 2010).

| Mecanismos de Desgaste | Pás das Turbinas |
|-------------------------------------------|------------------|
| Erosão (particulado sólido, gota de água) | ✓ |
| Tribocorrosão | ✓ |
| Corrosão | ✓ |

No caso presente a incrustação biológica deve manifestar-se com uma intensidade muito menor, quase inexistente, tratando-se de um componente que permanece a maior parte do tempo em movimento, dificultando a propagação desses incrustantes. Contudo, os materiais têm de suportar esse ambiente marinho agressivo, com sua água salgada corrosiva, com possibilidade de incrustação biológica e particulados abrasivos em suspensão (WOOD; BAHAJ; TURNOCK; WANG *et al.*, 2010). O desafio de manter dispositivos operacionais para mais de 50 anos requer uma compreensão clara do desempenho dos materiais que os constituem. A engenharia de materiais ainda tem muito a contribuir para esse setor, para que se alcancem instalações de maior porte e que possam suprir certo percentual de participação na matriz de produção energética mundial.

Diante de tais condições, é relevante que o desenvolvimento tecnológico dos materiais empregados na fabricação dessas turbinas passe por uma investigação da tribologia de seu funcionamento, razão pela qual esta pesquisa aborda fenômenos de desgaste erosivo, corrosão marinha do alumínio e sinergismo por erosão-corrosão, a fim de se obter uma avaliação do sistema tribológico atuante em pás de turbina dos conversores de energia das ondas do tipo coluna de água oscilante (ver anexo IV).

A Figura 14 apresenta um gráfico comparativo do número de publicações ao longo dos anos, obtidos no portal de periódicos da Capes, sendo descritos os artigos revisados por pares sobre os assuntos relacionados a este trabalho como: (a) *erosion-corrosion*, (b) *marine corrosion aluminum*, (c) *oscillating water column*, (d) *wear erosion* e (e) *tribology*. O crescente interesse científico nessas áreas de conhecimento demonstra a relevância deste trabalho. Ao realizar uma busca com todos esses assuntos em conjunto não foi encontrada nenhuma publicação, o que evidencia a originalidade desta pesquisa.

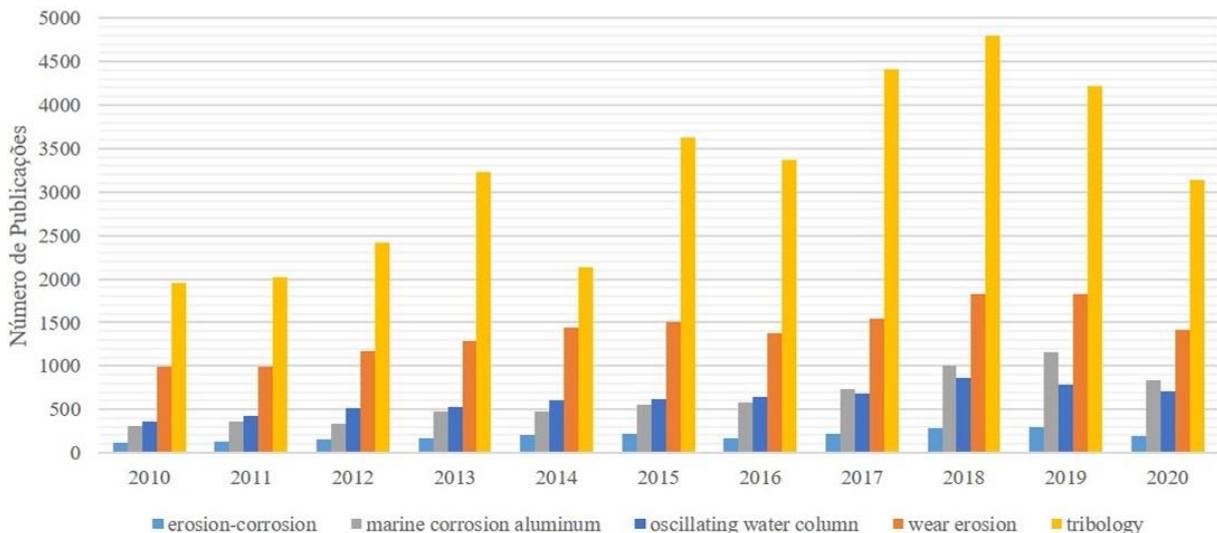


Figura 14 – Número de publicações mostradas no website www.periodicos.capes.gov.br correlacionadas as áreas de estudo. Acessado em 04/12/2020.

Tendo em vista escassez de informações, algo factível quando se propõe investigação sobre um caso real, o que se pretendeu fazer foi avaliar o papel de cada um dos fatores de desgastes mecânicos, físicos e químicos advindos das condições de serviço as quais a turbina da COP está submetida. É comum, na sequência de tempestades no alto-mar, dar-se a formação de ondas ininterruptas, sem ruídos e bem definidas, que são normalmente designadas por *swell*. Em uma central de ondas, quando um *swell* chega à costa trazendo

ondulações propícias para seu funcionamento, essas podem durar semanas e sem interrupções de operação. Fato esse que expõe as pás da turbina a vários mecanismos de desgaste de forma simultânea.

Optou-se pela simulação em laboratório, com o desenvolvimento de equipamentos e de metodologias próprias para alcançar desgastes erosivos a seco, em meio líquido e com ambos os componentes juntos para correlacioná-los com o comportamento à corrosão. Um revestimento protetor foi proposto a nível de se comparar o efeito das cicatrizes resultantes nos corpos-de-prova alvo devido à utilização de erodentes diferentes sobre materiais com propriedades diversas.

Com o avanço tecnológico de processos de manufatura de produtos e serviços, é de se esperar que investigações como a realizada neste trabalho, com escassez de equipamentos padronizados e normas, tornem-se mais comuns. A definição de uma metodologia para a abordagem de estudos de casos como o aqui apresentado permitirá a avaliação do desempenho e a busca da otimização de materiais de engenharia para a aplicação em equipamentos sujeitos a condições de serviços iguais ou similares às da usina do Pico. É nesse contexto que se insere este trabalho.

Capítulo 2

Objetivos

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é a investigação e caracterização do sistema tribológico atuante na degradação da superfície das pás de alumínio da turbina da COP e a análise de desempenho de um revestimento protetor em condições tribológicas similares, com vista a contribuir cientificamente para o avanço das propriedades dos materiais das turbinas dos OWCs utilizados para a geração de energia elétrica proveniente das ondas do mar.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para a execução deste trabalho é necessário atingir os seguintes objetivos específicos:

- a) realizar visita técnica na COP para avaliar o sistema tribológico existente, medir o desgaste da turbina e confirmar a liga de alumínio utilizada em sua fabricação;
- b) indicar e testar o desempenho de um revestimento protetor apto a resistir a ação dos mecanismos de desgaste atuantes sobre as pás da turbina da COP;
- c) diferenciar as cicatrizes resultantes de desgaste erosivo utilizando ar comprimido como fluido de trabalho junto a uma solução salina, areia calibrada e/ou ambas simultaneamente sobre superfícies de corpos-de-prova em alumínio e em revestimento protetor;
- d) simular corrosão em superfícies lisas e rugosas (após desgaste erosivo) sobre corpos-de-prova em alumínio e em revestimento protetor e analisar os respectivos resultados;
- e) indicar e classificar a presença de sinergismo no desgaste da turbina da COP;
- f) testar, analisar e apresentar a contribuição de diferentes erodentes e variáveis de processo sobre ensaios de erosão em corpos-de-prova em alumínio e em revestimento protetor.

Capítulo 3

Referencial Teórico

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 CONDIÇÕES DE FUNCIONAMENTO DA TURBINA DA COP

A variação de temperatura no interior da tubulação da turbina nunca foi mensurada, mas acredita-se que seja próxima à temperatura ambiente local que apresenta, segundo dados estatísticos da Organização Meteorológica Mundial (WMO - *World Meteorological Organization*) baseados em medições realizadas desde 1961, os valores médios ao longo do ano de 17,4 °C e valores máximos e mínimos na ordem de 25,5 °C e 11,4 °C. Talvez tenha uma pequena variação sobre a temperatura devido aos efeitos adicionais de compressão/expansão do ar na câmara ou eventuais fricções em algum componente mecânico. O mesmo comportamento é esperado para valores de umidade, já que essa também nunca foi mensurada e pode ser acrescida do contato com a água salina em dias de maior poder energético das ondas. A Figura 15 apresenta o comportamento da temperatura na região.

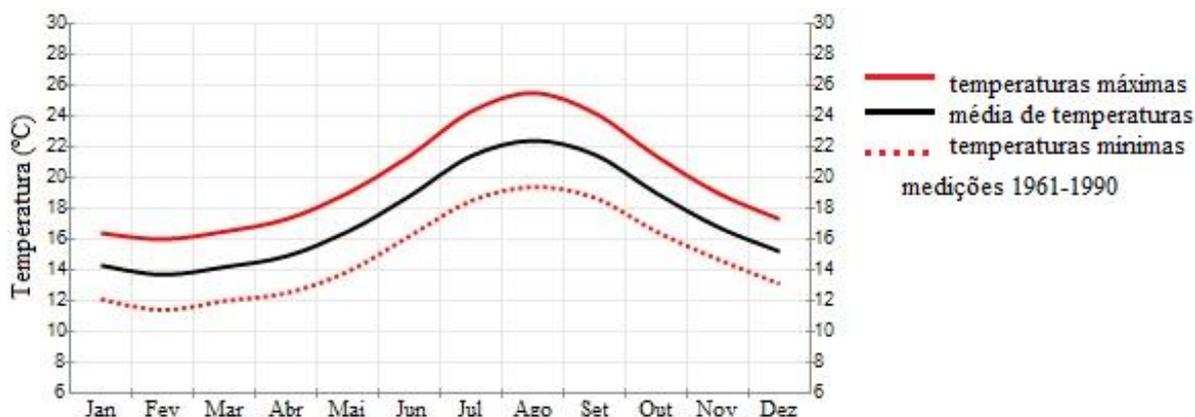


Figura 15 – Temperaturas médias, máximas e mínimas encontradas no local de instalação da central do Pico. Adaptado de (INSTITUTE; CORPORATION).

O giro da turbina raras vezes estabiliza a uma determinada velocidade de rotação, podendo variar entre as 750 e as 1500 rpm, dependendo sempre do estado do mar e tendo também ligeiras flutuações devido ao comportamento cíclico das ondas, pois a câmara de pressão força o ar a escoar na direção de saída, quando a coluna de água sobe e na direção contrária quando desce, podendo a direção do fluxo de ar na conduta variar em poucos segundos. Deve-se considerar também o caráter imprevisível, pois, apesar de ser possível estimar com alguma precisão o estado do mar, é possível existir, esporadicamente, uma onda

que seja muito mais energética que as anteriores. O caráter agressivo provém da possibilidade de ocorrência de tempestades, que potencializam o efeito de todos os mecanismos de desgaste de material característicos desse ambiente e do funcionamento dos OWCs.

O desgaste é definido como o processo no qual ocorre dano superficial causado por uma interação envolvendo uma série de fenômenos físicos/químicos (mecanismos de desgaste) com outra superfície, corpo ou fluido. Este processo não é apenas uma propriedade do material, ele é uma resposta integral do tribo-sistema em questão. Isso significa que a quantidade e a manifestação do desgaste é determinada pelas condições operacionais, as condições ambientais, a física da interação e pelas propriedades de material das partículas ou gotículas e as propriedades do material da superfície da pá da turbina (SLOT; GELINCK; RENTROP; VAN DER HEIDE, 2015).

Por motivo de segurança e para auxiliar no controle de velocidade de rotação, a turbina da COP conta com duas válvulas de segurança em série com a turbina e uma válvula de alívio que funciona como um caminho alternativo à passagem do ar pressurizado pela ação do movimento da onda do mar, quando seu poder energético excede valores considerados adequados para seu funcionamento. Entretanto, para se ter uma real percepção da contribuição do funcionamento dessas válvulas de segurança e de alívio, foi realizado um registro das medições de pressão dentro da câmara, quando a turbina estava parada e ambas as válvulas totalmente fechadas e outro em condições de funcionamento normais, ou seja, com a turbina em movimento e as válvulas atuando no controle de regularização da pressão de ar dentro da câmara e por sua vez na rotação da turbina. Percebe-se uma redução considerável dos valores de pressão, o que demonstra a importância da funcionalidade das válvulas de segurança e de alívio, pois sem essas o ambiente de trabalho seria muito mais agressivo. A Figura 16 apresenta esse comparativo de variação de pressão.

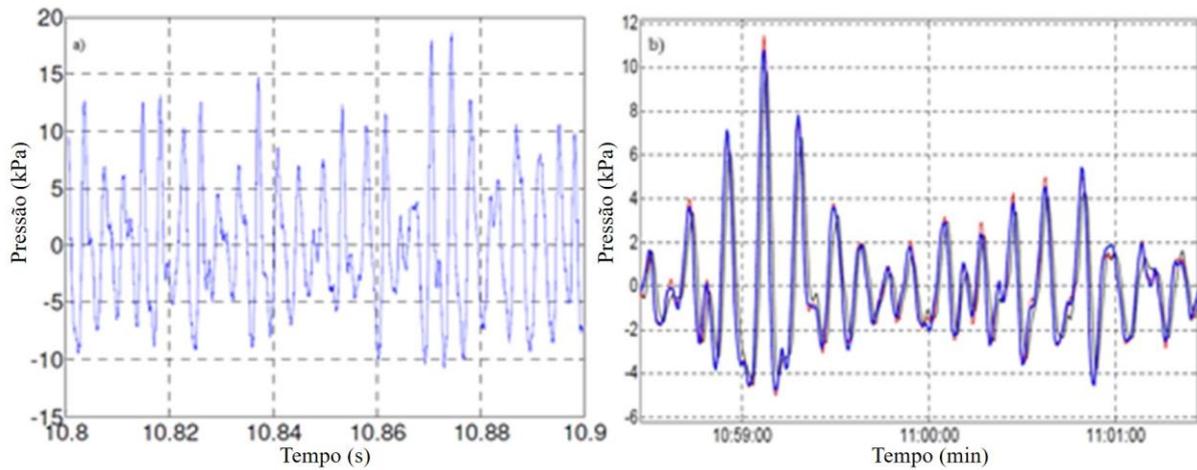


Figura 16 – Série temporal da pressão de ar dentro da câmara: a) com válvulas fechadas (aquisição em intervalos de 0,2s) e b) com válvulas em funcionamento (aquisição em intervalos de 1min, sendo que as curvas em vermelho, preto e azul representam valores obtidos de três sensores simultaneamente). Adaptado de (LE CROM; BRITO-MELO; NEUMANN; SARMENTO, 2009; SARMENTO, 2010).

A nível de comparação e para auxiliar na compreensão do funcionamento do dispositivo OWC, a Figura 17 apresenta a relação entre a variação da altura do nível da superfície da água do mar dentro da câmara de ar e as pressões decorrentes dessa variação.

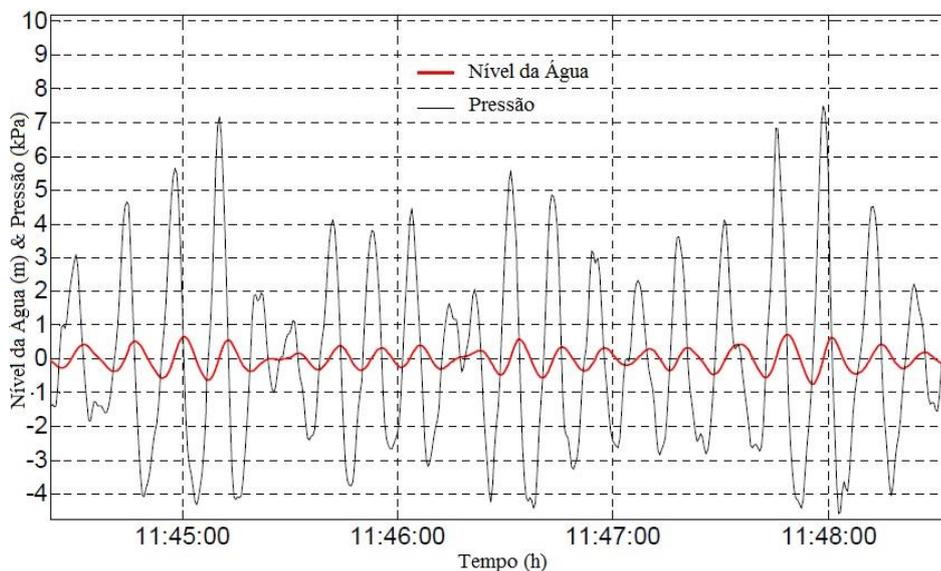


Figura 17 – Elevação da superfície livre da água dentro da câmara de ar em comparação com os valores da pressão de ar dentro da câmara. Adaptado de (SARMENTO, 2010).

Considerando que as ondas do mar têm características diferentes em seu empolamento e em sua descida, é de se esperar valores diferentes de pressão em cada lado da turbina. A Figura 18 apresenta valores obtidos de pressão em cada lado da turbina.

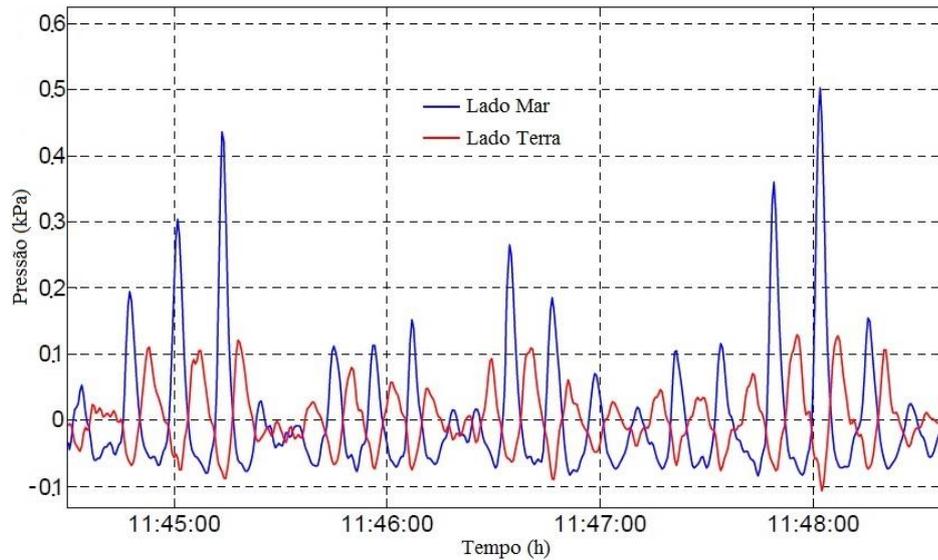


Figura 18 – Pressão dinâmica em ambos os lados da turbina. Adaptado de (SARMENTO, 2010).

Já a Figura 19 apresenta valores do fluxo de ar na turbina e valores do fluxo de ar medidos na parte superior da câmara de ar. Percebe-se valores bem semelhantes, o que indica a eficiência de transferência de energia pneumática da câmara de ar para o duto onde está a turbina.

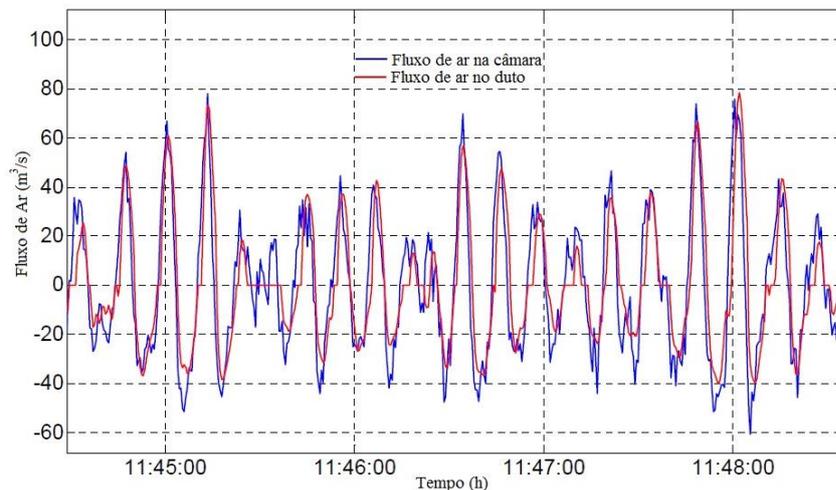


Figura 19 – Fluxo de ar no duto da turbina comparado com o fluxo de ar deslocado pela ação de movimento da superfície livre de água dentro da câmara de ar. Adaptado de (SARMENTO, 2010).

A Figura 20 apresenta uma comparação simultânea entre valores do fluxo de ar e a pressão de ar no interior do duto da turbina.

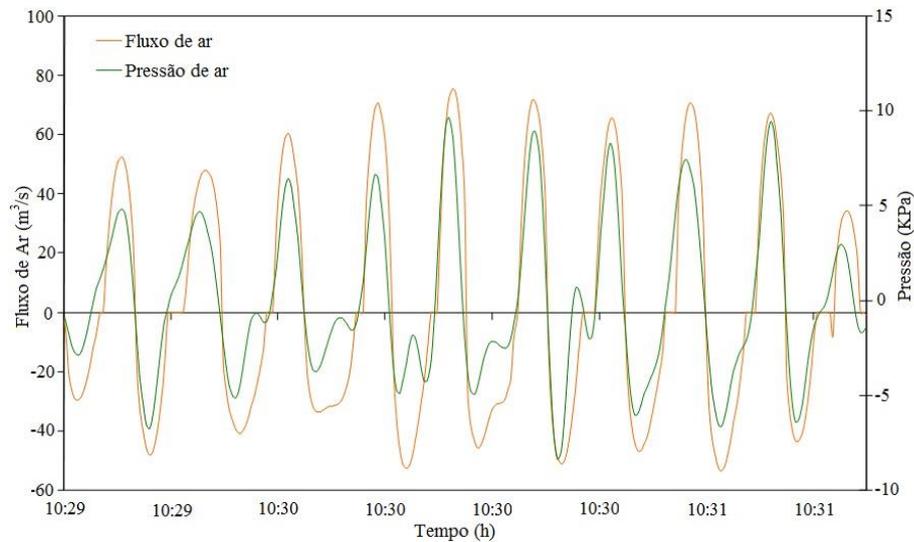


Figura 20 – Série temporal de dois minutos que representa a variação da pressão estática e o fluxo de ar no duto da turbina da Central do Pico. Adaptado de (NEUMANN; BRITO E MELO; LE CROM, 2001a).

Os valores de pressão estática em ambos os lados da turbina são apresentados na Figura 21.

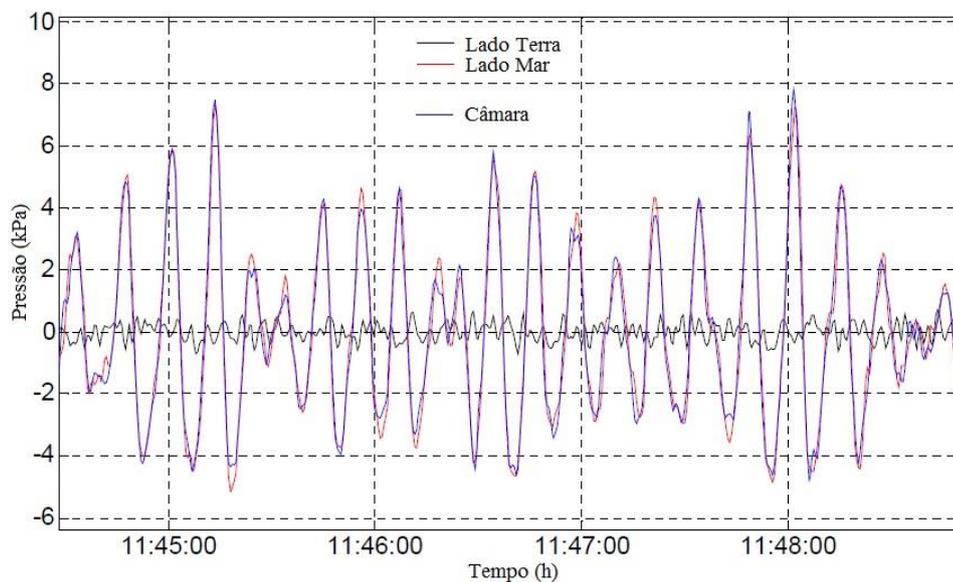


Figura 21 – Pressões estáticas em ambos os lados da turbina (terra e mar) e no interior da câmara de ar. Adaptado de (SARMENTO, 2010).

A partir dessas informações operacionais fornecidas pelo WavEC, pode-se concluir que as condições a que o material constituinte das pás dessa turbina está sujeito são muito

agressivas, e que as variações temporais podem, por vezes, acelerar o desgaste desse material e, por sua vez, reduzir o seu tempo de vida útil e exigir manutenção frequente. A Tabela 5 apresenta um resumo das características mencionadas neste capítulo.

Tabela 5 – Características de funcionamento da central de ondas do Pico.

| Características | Máximo | Mínimo |
|-------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Temperatura | 25,5 °C | 11,4 °C |
| Pressão Estática | 11 kPa (0,11 bar) | -5 kPa (0,05 bar) |
| Pressão Dinâmica | 0,45 kPa (0,0045 bar) | -0,1 kPa (0,001 bar) |
| Fluxo de Ar | 80 m ³ /s | -55 m ³ /s |
| Velocidade Ar | 70 m/s | 45 m/s |
| Velocidade de Rotação Turbina | 1450 RPM | 750 RPM |
| Altura do Nível do Mar | 1 m | -0,75 m |

Por se tratar de um sistema peculiar, pode-se então dizer que efeitos tribológicos são esperados e devem ser cuidadosamente analisados para compreender o mecanismo de desgaste das pás da turbina da COP. Assim, após apresentação das características do seu funcionamento, dá-se início a análise do ambiente marinho e dos materiais constituintes dessas pás.

3.2 O AMBIENTE MARINHO

Embora a química da água do mar nos oceanos não varie amplamente de uma parte do mundo para outro, existem diferenças na concentração de oxigênio dissolvido, pH, temperatura, ação das ondas, sólidos em suspensão e crescimento de incrustação biológica sobre superfícies, e que podem afetar profundamente as taxas de corrosão (HUDSON; PHILLIPS; WILKINS, 1980).

O mesmo pode se dizer quanto aos ambientes atmosféricos marinhos, também relativamente constantes em todo o mundo, variando somente na concentração dos seus componentes químicos principais. No entanto, os componentes menores variam de local para local, com a época do ano e as tempestades que possam ocorrer. As variações na química da atmosfera do oceano aberto tendem a ocorrer lentamente e em escalas horizontais e verticais que são grandes em comparação com as dimensões da maioria das estruturas marinhas. Tais mudanças graduais podem produzir uma mudança igualmente gradual da taxa de corrosão de materiais estruturais de acordo com a época e o local, mas eles não são suscetíveis de

produzirem mudanças no mecanismo de corrosão (SOARES; GARBATOV; ZAYED; WANG, 2009).

A atmosfera marinha, em geral, contém alto teor de cloreto, oxigênio e outros minerais corrosivos, além do *spray* de água do mar, decorrentes dos efeitos de movimento da onda. Essa região também é submetida a uma umidade relativa elevada. As variações na umidade relativa do ar causam a evaporação ou condensação de água. Sais podem ser detectados, o que pode resultar da maresia soprada pelo vento. Contudo, é importante notar que o ar introduzido na turbina não provém diretamente da atmosfera, mas sim da câmara de pressão, em contato com uma larga superfície de água bastante agitada e que, portanto, por si só, constitui um ambiente completamente diferente. Desta forma, não faz sentido comparar os resultados aqui obtidos com os parâmetros atmosféricos normais da ilha e respectivas taxas de corrosão atmosférica. Além disso, o *spray* leva contra as pás da turbina dos conversores OWCs dióxido de carbono (CO_2), sulfeto de hidrogênio (H_2S), dióxido de enxofre (SO_2) e trióxido de enxofre (SO_3), que são os gases contidos no ar e que aceleram a taxa de corrosão através da ativação da fina camada de eletrólito (SOARES; GARBATOV; ZAYED; WANG, 2009). A taxa de corrosão dos metais aumenta com o aumento da velocidade do ar que atravessa a turbina. A perda de materiais no sistema pode causar graves efeitos negativos na durabilidade da turbina, como o aumento da sua aspereza de superfície que definitivamente irá afetar o desempenho aerodinâmico (CHEN; LAM, 2015).

A corrosão atmosférica ocorre em uma superfície de metal ou liga metálica em contato com a atmosfera e, portanto, não imersa em água, sendo que envolve a interação entre as propriedades constituintes do material e do ambiente que está inserido. No entanto, para que a corrosão ocorra, uma fina película molhada precisa ser criada (condensação da umidade do ar ou também, como no caso da COP, gotículas de água do mar que atingem as pás da turbina), pelo que a umidade do ar em combinação com impurezas iniciam o processo de corrosão (SOARES; GARBATOV; ZAYED; WANG, 2009).

O estudo do efeito da temperatura e dos diferentes fatores ambientais sobre o comportamento da corrosão atmosférica demonstram que as taxas de corrosão são influenciadas principalmente por três parâmetros: tempo de umidade, temperatura e deposição de sal. Foi demonstrado que a corrosão em atmosfera marinha é principalmente influenciada pela umidade e é acentuada por contaminantes, tais como cloreto de sódio. A composição química do filme de água é importante, bem como a duração desse contato (SOARES; GARBATOV; ZAYED; WANG, 2009).

Normalmente, quando é abordada a questão litorânea associa-se a água salina e a areia. No entanto, no caso específico da COP, por se tratar de uma ilha formada por ação vulcânica, há também os microparticulados de rochas vulcânicas. A Figura 22 apresenta um exemplo de fragmento vulcânico removido nas proximidades da COP, sua microestrutura (500x) e sua análise química.

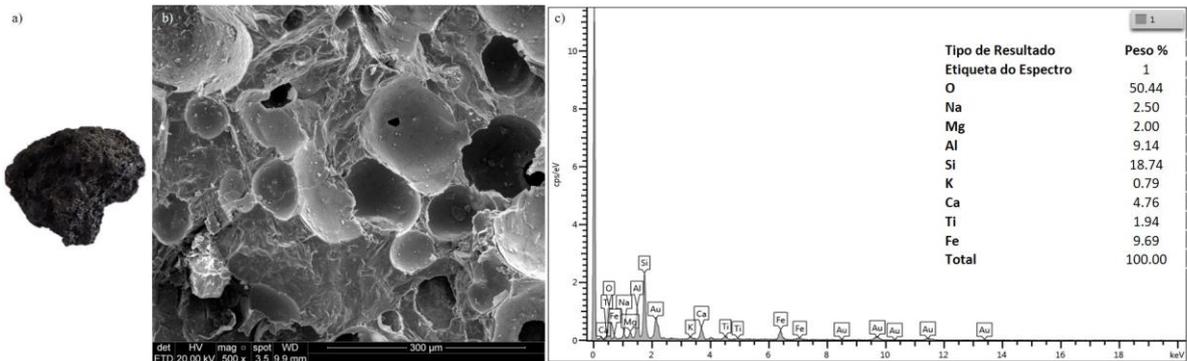


Figura 22 – Fragmento de rocha vulcânica, coletada pelo autor, com medidas aproximadas de 2 cm² e massa 5 g (a), micrografia (b) e respectiva análise química (c).

De acordo com a Figura 22, as rochas vulcânicas na ilha do Pico são compostas por silício, alumínio, ferro, cálcio e outros elementos químicos em menor quantidade, sendo que cerca de 50% de sua composição é oxigênio. A elevada porosidade dessas rochas vulcânicas facilita o seu desprendimento devido a ações das ondas, ventos e outras intempéries, bem como o seu deslocamento, seja pelo ar ou como elemento flutuante sobre a superfície do mar.

3.3 MATERIAIS DAS TURBINAS OWC

Como a principal função da turbina OWC é alterar a energia pneumática do fluxo de ar bidirecional em energia mecânica de rotação do eixo unidirecional, é esperado que as suas pás tenham que suportar uma elevada carga cíclica (tensões aerodinâmicas e centrífugas) e transferi-la para o seu eixo. Assim, os objetivos na seleção dos materiais para fabricação da turbina OWC são resistir aos efeitos de fadiga sob carregamento cíclico, bem como sobreviver à corrosão do ambiente marinho, sendo necessário observar uma adequada relação de força/peso. Por um lado requer-se materiais leves para que o início do movimento da turbina seja facilitado e para que o fluxo de ar promova uma maior velocidade das pás, mas, por outro lado, é necessário um peso suficiente para que a inércia mantenha o sistema em

movimento no intervalo entre duas ondas (SAPTONO, 2004). A resistência à erosão de gotículas de água também é muito importante (TAYLOR; CALDWELL, 1998).

A área de energia dos oceanos é naturalmente voltada para usar material compósito por suas propriedades anticorrosivas percebidas no ambiente marinho, bem como sua força específica e rigidez elevada (CHEN; LAM, 2015). Assim, as pás podem ser fabricadas a partir de materiais compósitos como os polímeros reforçados com fibra de vidro (GFRP – *Glass Fiber Reinforced Polymer*) ou os polímeros reforçados com fibra de carbono (CFRP – *Carbon Fiber Reinforced Polymer*), já que ambos têm excelente resistência à corrosão, porém baixa inércia. É de notar que a durabilidade dos materiais compósitos é consideravelmente inferior à durabilidade dos materiais metálicos em termos de erosão.

Os materiais compósitos podem ser restringidos por limitações de resistência, tornando-os apenas adequados para baixas velocidades de rotação, o que não é o caso da COP. Para aumentarmos a resistência ao impacto de partículas sólidas e de gotas de água salina, pode ser necessário um revestimento metálico de proteção. Entretanto, a aplicação desse revestimento protetor pode apresentar dificuldades de produção em termos de assegurar uma adesão adequada ao substrato de compósito (WEEB, 2005).

As pás, geralmente, têm sido fabricadas a partir de materiais metálicos, sendo os mais comuns o alumínio e o aço inoxidável ou uma combinação de ambos (WEEB, 2005). As pás de alumínio podem ser utilizadas em conjunto com discos de aço, mas o uso de metais diferentes em contato pode aumentar os riscos de corrosão, devido à formação de células galvânicas, particularmente em uma atmosfera úmida (WEEB, 2005).

Atualmente, com o desenvolvimento dos materiais pode-se minimizar a corrosão no ambiente marítimo, o que se verifica, por exemplo, pela tamanha expertise aplicada sobre embarcações de toda forma e tamanho. A corrosão em condições marinhas dos metais e das ligas metálicas podem ser classificadas em dois tipos (HUDSON; PHILLIPS; WILKINS, 1980):

- a) aqueles no qual a taxa de corrosão é determinada em grande parte pela oferta de oxigênio para suas superfícies. Maiores taxas de corrosão são observadas quando a água do mar e o oxigênio estão em abastecimento mais alto, ou seja, o *splash* e zonas de marés. Com o aumento da velocidade da água do mar, a corrosão também pode aumentar;

- b) aqueles que formam uma película aderente de óxido "passiva" protetora na superfície, resistência à atmosfera marinha, zona de respingo e água do mar, mas corrosão localizada muitas vezes pode ocorrer quando o acesso de oxigênio é restrito, por exemplo, na água do mar estagnada, sob a incrustação ou em crateras.

O titânio, em especial a liga Ti-6Al-4V, é teoricamente considerado como um dos materiais ideais para aplicação em turbinas OWC (TAYLOR; CALDWELL, 1998). No entanto, não há registros que confirmem a sua utilização em qualquer central piloto atualmente existente. Trata-se de uma liga alfa-beta que possui quantidade de elementos estabilizadores de ambas as fases e em quantidades equilibradas, o que proporciona boa resistência à tração (900 a 1200 MPa), elevada dureza (350 e 500 HV - pós recozimento), alta resistência à fadiga (240-510 MPa), excelente resistência à corrosão (formação da camada passivada de TiO₂), com sua temperatura de fusão entre 1604 °C e 1660 °C.

O aço inoxidável é provavelmente mais resistente à fadiga e, devido a sua maior densidade, fornece uma maior contribuição para a inércia do rotor. No entanto, o peso da pá levaria a uma maior dificuldade na etapa de partida da turbina, devido a maior inércia em torno do eixo radial da pá (WEEB, 2005). A série de aços AISI 300 baseia-se no sistema 18Cr-8Ni e dentre os aços dessa família destaca-se o AISI 316L, um aço inoxidável austenítico, que é o material indicado para turbinas em OWCs, sendo o material constituinte do estator da turbina da COP. Possui na sua composição o molibdênio, que tem como função principal aumentar a resistência à corrosão por pite deste aço, possuindo também maiores concentrações de Ni, que atua como estabilizador da austenite, tendo ainda influência na sua ductilidade, bem como uma baixa concentração de carbono (<0.03% massa). Tal variante é muito utilizada para aplicações em que se necessita recorrer a operações de soldagem, já que a menor concentração de carbono no material base resulta em uma menor formação de carbonetos de cromo nos limites de grão do material que foi submetido à operação de soldagem (LIPPOLD, 2005).

O alumínio possui baixo peso específico e oferece algumas vantagens em termos de resistência à corrosão, mas pode sofrer longas limitações em termos de fadiga sob carregamento cíclico, como trincas devido à vibração da pá, tornando-se um potencial e significativo problema operacional (WEEB, 2005).

Com a adição de elementos de liga ao alumínio permite-se a alteração das suas propriedades, como, por exemplo, o seu potencial eletroquímico, que pode tornar-se mais ou

menos negativo consoante o elemento adicionado. O magnésio, o zinco e o silício tendem a influenciar o potencial no sentido anódico (negativo), enquanto o cobre produz o efeito contrário, tornando o potencial mais catódico. Por sua vez, a redução do potencial eletroquímico do material favorece a passivação/resistência à corrosão do alumínio (maior espessura de óxido formada). Por esse motivo as ligas que apresentam melhores características de resistência à corrosão são as que pertencem às séries 3xxx (Al-Mn), 5xxx (Al-Mg) e 6xxx (Al-Mg-Si), para conformação plástica, e 3xx.x (Al-Si-Mg) para fundição. Por possuírem características bastante equivalentes, uma vez que todas apresentam excelente resistência à corrosão, o fator diferenciador para a tomada de decisão é a resistência mecânica frente ao tipo de projeto a que se pretende utilizá-las.

As ligas de alumínio da série 5xxx, que são as que melhores se adaptam a ambientes corrosivos, têm sua principal utilização em aplicações para atmosfera marinha e têm o Magnésio (Mg) como principal elemento de liga, com teores variando entre 3 e 5% massa. O Mg pode ser utilizado em conjunto com o Manganês (Mn) e o resultado são ligas não tratáveis com resistência à corrosão de moderada à elevada. Constitui um importante grupo de ligas de alumínio não tratáveis termicamente, ou sejam, não são endurecíveis por tratamento térmico de solubilização e envelhecimento, mas sim por solução sólida e encruamento (trabalho mecânico). Além desse ganho de resistência mecânica, o magnésio permite a essas ligas manterem um elevado nível de ductilidade, assim como excelente resistência à corrosão e soldabilidade (HATCH, 1984). As ligas Al-Mg também se destacam por uma ampla faixa de resistência e capacidade de apresentar excelente qualidade de acabamento superficial, como brilho intenso e baixa rugosidade. As ligas 5083 e 5086 são exemplos de ligas de alumínio contendo como segundo elemento maioritário o magnésio, utilizado com o principal objetivo de resistir à corrosão.

O projeto de uma turbina OWC compreende uma análise criteriosa das forças e resistências mecânicas exigidas em operação para uma escolha correta do material a ser empregado (TEASE; LEES; HALL, 2007). Nesse estudo, primeiramente, foi preciso identificar o exato material de fabricação das pás da turbina OWC da COP, pois os documentos e as informações fornecidas por companhias que participaram da implantação do projeto da COP não permitiram identificar qual a liga de alumínio havia sido utilizada na fabricação das pás. A informação, à época, foi tratada como segredo industrial e a única certeza era de se tratar de um alumínio marítimo, cabendo mencionar que, em meados dos anos 2000, o IST obteve acesso ao projeto da turbina e providenciou a fabricação de um jogo

reserva das pás, porém sem saber qual a liga de alumínio que estava instalada na COP. Em contato realizado com o grupo Voith (que em 2005, através da empresa Voith Hydro, comprou a WaveGen, mas em 2013 encerrou suas atividades) foram obtidas algumas informações relativas às centrais do Pico, LIMPET e Mutriku.

A central de Mutriku, localizada na Espanha, teve sua construção iniciada no ano de 2006, entrou em operação em julho de 2011 e permanece em atividade. Nessa central de ondas a empresa Voith Hydro utilizou a liga de alumínio 6082 T651, que possui uma boa soldabilidade, uma resistência mecânica razoável e uma boa usinabilidade. A presença de Mn requer que se empregue tratamentos térmicos para evitar que ocorra corrosão sob tensão no contorno dos grãos. O código T651 designa a necessidade de tratamento térmico para alívio de tensões (inclusive devido a soldas), ficando com aspecto mais escuro porque sofre resfriamento para envelhecimento acelerado. O uso desse material é restrito a máquinas de pequeno porte, em que a geometria é ditada muito mais pela sua aerodinâmica do que pelos limites de resistência mecânica. A espessura mínima que foi necessária para o perfil da pá desta turbina foi para resistir a valores máximos relativamente baixos na distribuição de tensões impostas ao material. Assim, a resistência à corrosão foi privilegiada.

Dessa forma, as pás da central de Mutriku apresentaram condições para fabricação a partir de chapas em alumínio, o que não era esperado para os rotores da COP. Este fato se explica porque as turbinas da COP possuem potência nominal bem maior - 400 kW contra 18,5 kW da central de Mutriku - resultando em dimensões mais avantajadas (diâmetro nominal de 2300 mm contra 750 mm da central de Mutriku) e tensões mecânicas incompatíveis com o emprego de espessuras suficientemente finas. Logo, suspeitou-se que o uso de rotores de alumínio fundido foi quase que obrigatório, pois havia a necessidade de conciliar a resistência mecânica em níveis aceitáveis para o serviço e ótima resistência à corrosão.

Segundo informações recebidas do setor de engenharia do grupo Voith, em janeiro de 2017, havia 95% de certeza de que o alumínio fundido utilizado na fabricação da turbina OWC da COP era o A356.0 T6/AlSi₇Mg_{0,3}. Inclusive, o grupo Voith informou que se, naquele momento, fossem realizados novos projetos com dimensões semelhantes aos encontrados na COP e em LIMPET, dentre as opções de materiais para a fabricação da turbina OWC ainda continuaria a ser usado o alumínio A356.0 T6/AlSi₇Mg_{0,3} ou aço inoxidável do tipo Duplex ou Super Duplex. Portanto, o alumínio A356.0 T6/AlSi₇Mg_{0,3} foi escolhido como a base (substrato) para confecção de corpos-de-prova e para receber o

revestimento protetor a ser desenvolvido por essa pesquisa de doutoramento, sendo que somente com a visita a COP seria possível confirmar se essa escolha foi correta.

O alumínio A356.0 T6/AlSi₇Mg_{0,3} pertence à família das ligas de alumínio da série 3xx.x, visto ter como principais elementos de liga o silício (7% massa) e o magnésio (0,35% massa). As ligas desta série são conhecidas por apresentarem ótimas características para fundição, boa aptidão a tratamentos térmicos e excelente resistência à corrosão. Na nomenclatura desta liga os sufixos “0” e “T6” representam os tratamentos térmicos de recozimento e solubilização seguidos de envelhecimento artificial realizados sobre a liga, respectivamente. Essa liga pode ser usada em aplicações onde é necessária uma boa resistência à corrosão aliada a uma boa resistência mecânica. A sua composição química pode ser analisada na Tabela 6.

Tabela 6 – Composição química do alumínio A356.0 T6/AlSi₇Mg_{0,3} (% massa). (DAVIS; ASSOCIATES; COMMITTEE, 1993).

| Al | Si | Mg | Cu | Ti | Fe | Zn | Mn |
|-------|---------|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|
| 91-92 | 6,5-7,5 | 0,25-0,45 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,1 | 0,1 |

Na sequência, apresenta-se, na Tabela 7, o resumo de algumas propriedades mecânicas, bem como o ponto de fusão das ligas de alumínio consideradas neste trabalho como possíveis materiais para fabricação de turbinas OWC.

Tabela 7 – Propriedades mecânicas e ponto de fusão do alumínio A356.0 T6/AlSi₇Mg_{0,3}. (DAVIS; ASSOCIATES; COMMITTEE, 1993).

| Tensão convencional de proporcionalidade a 0,2% (MPa) | Resistência à tração (MPa) | Dureza Vickers (HV) | Resistência à Fadiga (MPa) | Temperatura de Fusão (°C) |
|-------------------------------------------------------|----------------------------|---------------------|----------------------------|---------------------------|
| 152-234 | 221-310 | 77-103 | 60-90 | 554-615 |

Como exposto, existe uma diversidade de materiais aptos para serem utilizados na fabricação de turbinas OWC, resistindo a esforços mecânicos e corrosão marinha. No entanto, observa-se que a resistência ao desgaste por erosão não foi analisada como fator determinante para escolha dos materiais utilizados nessas centrais OWC.

Há estudos que sugerem que as pás não devem ser reutilizadas após apenas 6000 horas de funcionamento, o que é pouco, pois tais dispositivos são fabricados para, no mínimo,

30000 horas de serviço (WEEB, 2005). Por causa da exigência sobre os materiais da turbina, do ambiente salino e dos mares agitados, as turbinas atuais sofrem penalidades de desempenho (DRIVER, 2008). Um material capaz de impedir a erosão e depósitos de sais nas pás da turbina, reduziria os custos de manutenção (BORRÁS-FORMOSO; FERREIRO-GARCIA; MIGUEL-CATOIRA; MIGUÉLEZ-POSE, 2015). Já que efetuar a manutenção no meio marinho é caro, demorado e apresenta muitos riscos, torna-se importante que a manutenção necessária seja, de preferência, minimizada, apenas exigindo inspeção anualmente ou menos. Dessa forma, é essencial conhecer o mecanismo de desgaste desses materiais, com vista à escolha de um revestimento que possa minimizar os efeitos da erosão por jato de água salina com microparticulados.

3.4 EROSÃO POR PARTICULADO SÓLIDO E POR IMPACTO DE GOTA DE ÁGUA SALINA

O desgaste mecânico é um fenômeno superficial devido ao contato de superfícies e o meio em movimento, que resulta no desprendimento de partículas dessa superfície. A variedade de fatores que ocasionam o desgaste, torna o seu estudo bastante complexo, ainda mais que mecanismos de naturezas diversas podem ocorrer simultaneamente. O desgaste resultante é sempre uma propriedade do sistema tribológico e depende da combinação dos materiais envolvidos e suas propriedades físicas e químicas.

O fenômeno da erosão em materiais tem sido constatado desde o século XIX, porém uma análise mais bem fundamentada sobre o processo de erosão ocorreu apenas mais tarde, no início do século XX (FINNIE, 1995), envolvendo a análise da estrutura de superfícies erodidas (SHEWMON; SUNDARARAJAN, 1983). Conceitualmente, a erosão é uma forma de desgaste caracterizada pela perda progressiva de material de uma superfície sólida devido à interação mecânica entre a superfície e um fluido, um fluido multicomponente ou partículas líquidas ou sólidas impactantes (G40-15, 2015). Já em outros casos pode ocorrer um ganho de peso através da incrustação de partículas erodentes, ou mesmo por oxidação da superfície quando a temperatura for suficientemente elevada (FINNIE, 1995).

O fator determinante do desgaste por impacto sucessivo de partículas que ocorre durante a erosão é o comportamento elástico ou inelástico do material submetido ao ataque. A essa suposição estão associados os dois modelos distintos relativos ao desgaste erosivo encontrados na literatura. São os modelos de erosão frágil e de erosão dúctil. Na erosão frágil,

o material é removido da superfície pela formação de trincas, enquanto no processo dúctil a remoção é feita pelo processo de deformação plástica.

Outra questão importante no estudo do desgaste por impacto sucessivo de partículas, sejam elas sólidas, líquidas ou uma combinação de ambas, é a fadiga superficial de contato, onde ocorre a degradação das propriedades mecânicas que levam à falha do material (torna-se frágil e rompe). A falha é o efeito consequente de esforços alternados em pontos de concentração de tensões. Esses pontos podem ser microfissuras presentes no material desde a sua manufatura ou podem surgir nos processos de fabricação, como por exemplo, na usinagem ou em tratamentos térmicos. Se nos pontos de concentração de tensões for ultrapassada a tensão de escoamento do material, será iniciada uma microfissura. Com a continuidade dos ciclos de esforços, nos pontos nos quais a tensão de escoamento é ultrapassada, as microfissuras formadas crescerão, diminuindo a seção resistente da peça até o ponto em que esta rompa repentinamente. Dificilmente materiais polidos apresentarão microfissuras na sua superfície, pois só há pontos de concentração de tensão no interior do corpo, diferentemente dos corpos com rugosidade superficial, que tem pontos de concentração de tensões também na sua superfície. Quanto mais pontos de concentração de tensões, maior é a probabilidade da peça romper por fadiga superficial de contato.

Para compreender os mecanismos do desgaste erosivo é preciso conhecer a natureza e a magnitude dos fenômenos que agem transferindo energia do erodente para a superfície do material alvo durante o breve contato, pois são esses fenômenos que determinam a extensão e a morfologia da deformação resultante do impacto, podendo levar à remoção do material atingido.

A natureza e a magnitude dos fenômenos que afetam o desgaste erosivo são numerosas, podendo ser (FINNIE, 1995):

- a) relativas ao impacto (operacionais): velocidade da partícula (V), ângulo de impacto (α), temperatura, número de partículas por unidade de área por unidade de tempo, corrosividade do meio;
- b) relativas à partícula erosiva: tipo de material, tamanho, forma, propriedades físicas e mecânicas (densidade, dureza etc.);
- c) relativas ao material (superfície): tipo de material, morfologia, nível de tensões, propriedades físicas e mecânicas (densidade, dureza, tenacidade etc.), rugosidade, tamanho de grão e porosidade.

A velocidade de impacto das partículas erodentes tem um significativo efeito sobre a taxa de erosão de um material. Se a velocidade for muito baixa, as tensões de impacto são insuficientes para causar deformação plástica e, conseqüentemente, provocar processos de desgaste da superfície. Já se for muito alta, pode destruir completamente a superfície, sem possibilidade de análise de processo. Sendo assim, a velocidade de impacto pode determinar que o material erodido seja plasticamente deformado e que, depois de repetidos ciclos de deformação, tenha sua superfície desgastada.

O ângulo de impacto é definido como sendo o ângulo formado pela superfície do material alvo e a linha de trajetória entre as partículas erodentes (SUNDARARAJAN; ROY, 1997). A influência do ângulo de impacto nas taxas de erosão se dá em função da natureza do material alvo. Em materiais dúcteis, a máxima taxa de erosão acontece com baixos ângulos de impacto entre 15 e 30° (FINNIE, 1995), não sendo afetados pela variação da temperatura, pois mesmo em temperaturas elevadas, continuam exibindo um comportamento dúctil frente ao desgaste erosivo (SUNDARARAJAN; ROY, 1997).

As quantidades de partículas em relação à área atingida e o tempo dessa interação, definem a taxa do processo erosivo, sendo uma variável fundamental no estudo erosão-corrosão por auxiliar na compreensão do mecanismo de desgaste, de forma a identificar se estão erodindo primariamente o metal base, o óxido formado na corrosão ou até mesmo resultando em colisões entre si. Resultados experimentais mostraram que um excesso de fluxo acarreta em um decréscimo na taxa de erosão (Figura 23) devido ao choque das partículas incidentes contra as partículas que ricocheteiam após o impacto contra a superfície (ANAND; HOVIS; CONRAD; SCATTERGOOD, 1987).

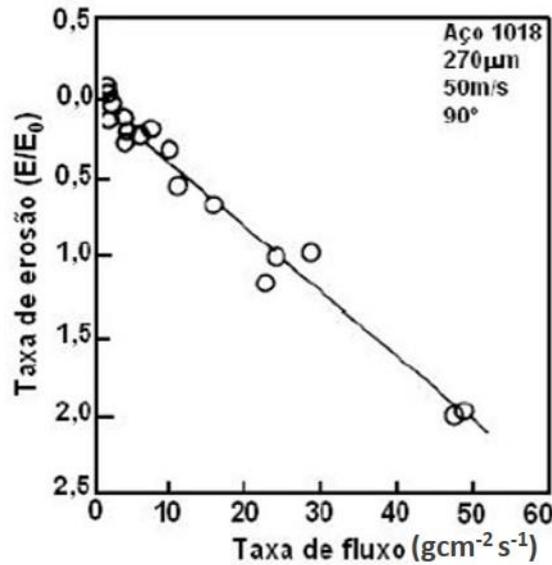


Figura 23 – Influência da taxa de fluxo de partículas erosivas na taxa de erosão de um aço 1018 (ANAND; HOVIS; CONRAD; SCATTERGOOD, 1987).

Na Figura 24 abaixo, o esquema da geometria do impacto de particulado sólido evidencia o efeito de ricocheteamento, sendo que na Figura 24 (a) tem-se a zona de colisão definida pela intersecção do feixe incidente e nuvem de partículas ricocheteadas (impactos oblíquos). Já na Figura 24 (b) a zona de colisão coincide com a nuvem de ricocheteamento (impactos a 90°). A Figura 24 (c) representa a vista do feixe de partículas em plano de seção transversal dx , com partículas incidentes (escuras) e partículas de ricocheteamento (claras), ambas com diâmetros iguais, sendo que seus centros estão em um círculo de raio D que define a seção transversal de colisão σ (ANAND; HOVIS; CONRAD; SCATTERGOOD, 1987).

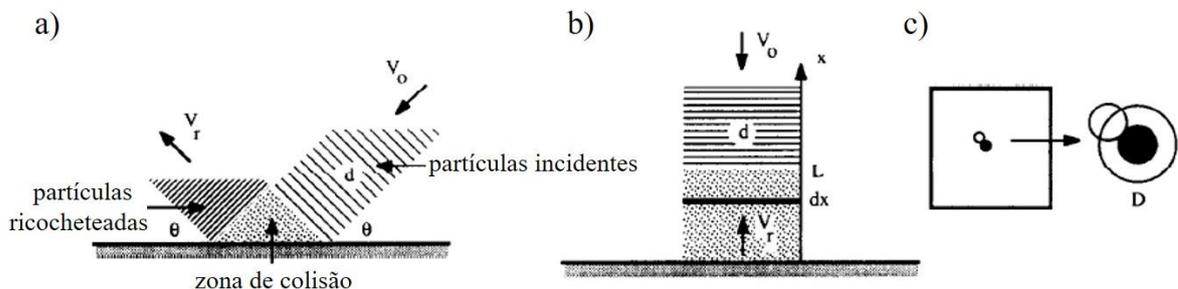


Figura 24 – Esquema ilustrando a geometria do impacto da erosão de particulado sólido. Adaptado de (ANAND; HOVIS; CONRAD; SCATTERGOOD, 1987).

O tamanho de partícula do erodente também é uma variável importante no estudo do comportamento da erosão. A taxa de erosão aumenta em função do aumento do tamanho de partículas erodentes, comportamento evidenciado com partículas de tamanho entre 50 a 100 μm . Entretanto, a variação das taxas de erosão com o tamanho de partículas erodentes é difícil de quantificar, pois, geralmente, um conjunto de outros fatores combinados influenciam a perda de massa, como o número de partículas erodentes atingindo o alvo, sua velocidade e energia cinética, sua forma e ângulo de impacto, sem desconsiderar o choque entre as partículas incidentes e as que ricochetearam após o impacto contra a superfície do material submetido à erosão (LIEBHARD; LEVY, 1991).

A forma das partículas erosivas tem sua contribuição, como por exemplo, partículas com ângulos agudos causam desgaste maior do que partículas arredondadas. Entretanto, somente quando a dureza das partículas se aproximar da dureza do alvo é que a forma da partícula terá influência sobre a taxa de desgaste erosivo (SUCKLING; ALLEN, 1997).

A dureza é uma das propriedades essenciais, tanto das partículas erodentes como da superfície alvo, pois a relação entre elas caracteriza grande parte da quantidade de desgaste obtido. O quartzo ou sílica (óxido de silício) é o abrasivo natural mais comum, tendo uma dureza de aproximadamente 800 kgf/mm (800 HV). Uma superfície em contato com quartzo deve ter dureza superior a esse, a fim de evitar o desgaste erosivo. Desta maneira, a dureza da superfície alvo deve ser de 120% a dureza das partículas erosivas (HUTCHINGS, 1992). Esta relação é válida quando o mecanismo de desgaste é o corte ou microcorte, onde a propriedade de maior significância na taxa de desgaste é a dureza. Contudo, um aumento deliberado da dureza não deve ser realizado em detrimento da tenacidade. Caso contrário, o impacto das partículas erosivas pode causar fraturas frágeis (DIVAKAR; AGARWAL; SINGH, 2005).

Supondo-se haver apenas a deformação plástica de um metal quando sua superfície é atingida pelo impacto de partículas erodentes rígidas, pode-se considerar três mecanismos de desgaste distintos, de acordo com (COUSENS; HUTCHINGS, 1983), (HUTCHINGS; LEVY, 1989) e (FINNIE, 1995):

- a) para impactos oblíquos, o mecanismo de corte ou microcorte (tipos I e II);
- b) sulcamento;
- c) para impactos próximos à normal, o desprendimento por formação de protuberâncias.

A Figura 25, muito conhecida na literatura, apresenta estudos experimentais do comportamento desses três mecanismos em uma única ilustração, sem considerar a possível rotação da partícula quando do impacto com a superfície (FINNIE, 1995). No primeiro caso (1), para ângulos menores que 20° , o autor sugere que a partícula impactante lasca o metal como em um corte. Já no segundo (2), para ângulo próximo a 30° , sugere que ocorre um acúmulo de material empilhado no final da cratera, que pode ser retirado com o impacto de partículas subsequentes. No último caso (3), para ângulos próximos à normal, muito menos material seria arrancado da superfície.

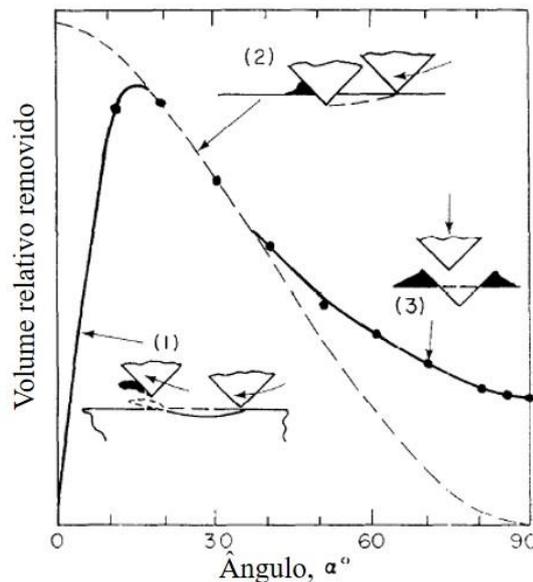


Figura 25 – Resultados experimentais para a erosão de um metal dúctil (linha contínua) e os três mecanismos postulados para remoção de material. Adaptado de (FINNIE, 1995).

O mecanismo de corte I considera que a partícula angular gira para frente no impacto, indentando o metal e levantando uma grande lasca de material no final da cratera. Embora esta lasca não seja geralmente desprendida em um único impacto, é claramente vulnerável à remoção pelo impacto de uma partícula subsequente apropriadamente orientada. Neste caso, o balanço energético que ocorre entre a partícula incidente e o material atingido é mais complexo, uma vez que a forma e a orientação da partícula são importantes. A Figura 26, baseada nos resultados de (HUTCHINGS, 1977), demonstra que a energia cinética rotacional do ricocheteamento da partícula pode ser apreciável, estimando que 40-80% da energia cinética seja dissipada no trabalho plástico.

No corte do tipo II, a partícula gira para trás durante o impacto, removendo uma lasca do material como uma ação de usinagem, porém é favorecido por apenas uma pequena faixa de ângulos de impacto e orientações da partícula e, portanto, ocorre com muito menos frequência do que o modo de corte do tipo I. Entretanto, ambos os tipos de comportamento foram observados por fotografias de alta velocidade em modelos experimentais e podem ser identificados pelas cicatrizes da superfície impactada por partículas erodentes irregulares. Também podem ser preditos teoricamente a partir do modelo plástico-rígido de indentação (HUTCHINGS, 1977).

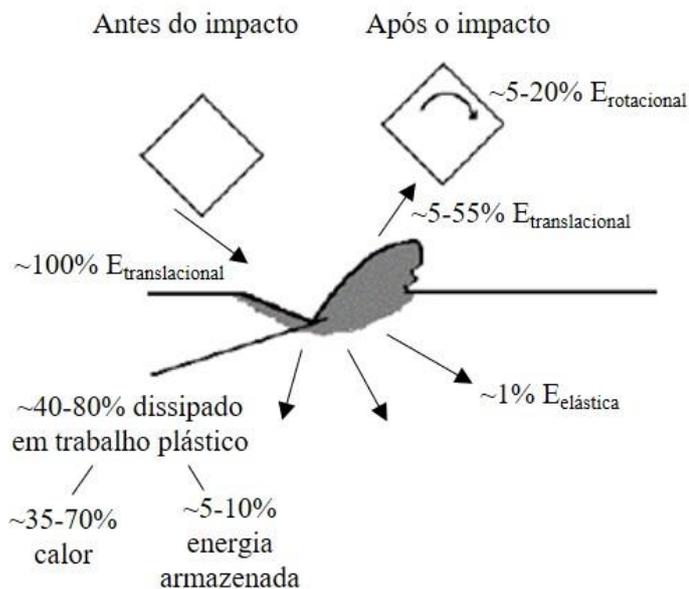


Figura 26 – Balanço da energia no impacto de partículas erodentes angulares no ângulo de impacto de 30°. A remoção de material ocorre pelo mecanismo de corte do tipo I. Adaptado de (HUTCHINGS, 1977).

No mecanismo de sulcamento, o metal deslocado é extrudado em uma borda no final da cratera de impacto e, dependendo do ângulo de impacto e velocidade, a borda pode se destacar, formando uma fonte de perda de massa (HUTCHINGS; WINTER; FIELD, 1976). A Figura 27, indica que para o impacto por formação de sulcos no material de uma partícula esférica no ângulo de 30°, cerca de 40% da energia inicial está disponível para formar a indentação e, assim, causar a erosão.

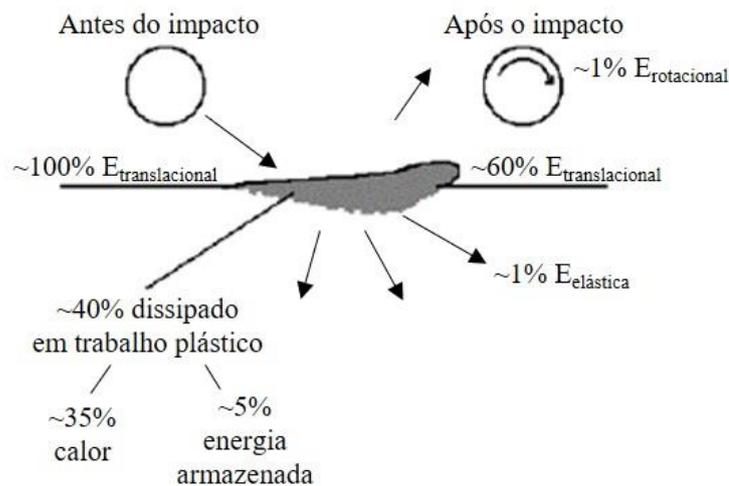


Figura 27 – Balanço da energia no impacto de partículas erodentes esféricas no ângulo de impacto de 30° . A remoção de material ocorre pelo mecanismo de formação de sulcos. Adaptado de (HUTCHINGS, 1977).

Para impactos próximos à normal, o mecanismo de erosão em materiais metálicos pode ser dividido em três fases distintas que ocorrem sequencialmente (HUTCHINGS; LEVY, 1989). Na fase inicial, o impacto da partícula forma uma cratera e o material é extrudado ou desprendido desta cratera, formando e/ou aumentando a borda desta cratera. Na segunda fase, o metal deslocado é deformado por impactos subsequentes, podendo conduzir a um deslocamento lateral do material, o qual é destacado da superfície, ou ainda ser acompanhado por uma fratura dúctil nas regiões mais deformadas. Finalmente, após relativamente poucos impactos, o material deslocado torna-se severamente deformado, e é então destacado da superfície por uma fratura dúctil. Este mecanismo tem sido chamado de platelet (LEVY; CHIK, 1983).

O mecanismo de platelet pode gerar um fluxo no metal durante a erosão, modificando a superfície do material erodido. Isto significa que durante estágios iniciais da erosão, estabelece-se uma estrutura subsuperficial, com uma camada microestrutural modificada em forma de pá, contendo trincas e partículas de erodentes incrustadas. Esta camada é considerada mais dura que o material base. A contínua colisão de partículas sobre esta superfície vai fragilizando o material. Desta forma, a tensão compressiva resultante neste material causa a indentação na superfície, erodindo o material com um processo de extrusão na forma de plaquetas (COUSENS; HUTCHINGS, 1983).

Conforme apresentado na Figura 28, 1 a 10% da energia cinética inicial de uma partícula chocando segundo um ângulo de 90° (assumida como esférica) é restituída à

partícula por forças elásticas. Muito da energia inicial é dissipada no alvo. A energia contida no campo de onda elástica, o qual não pode contribuir para a erosão, pode ser estimada, e é descrita como 1 a 5% da energia inicial, deixando cerca de 90% gasto no trabalho plástico. Para isto, até 10% será armazenado no metal em discordâncias e outras imperfeições cristalinas, deixando 80% da energia cinética da partícula que deve ser dissipada em calor (HUTCHINGS, 1977).

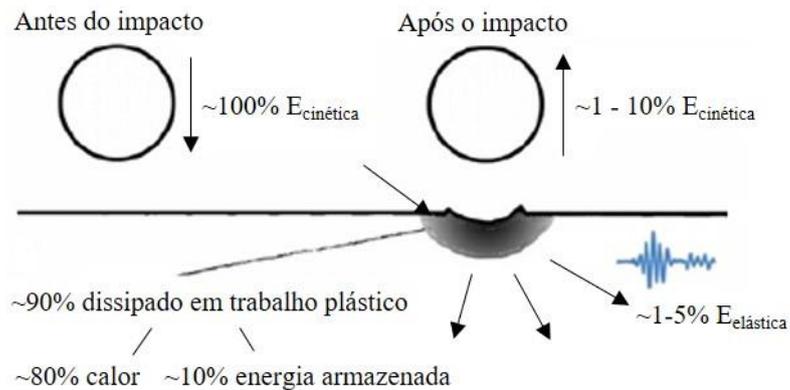


Figura 28 – Balanço da energia no impacto de partículas erodentes esféricas no ângulo de impacto de 90°. Adaptado de (HUTCHINGS, 1977).

O desgaste erosivo, causado principalmente por impacto de gotas de água salina, pode ser dividido em dois regimes (ZHANG; JOHANSEN; BERNAD; KIIL, 2015): o primeiro ocorre diretamente no local de impacto e pode iniciar a deformação na superfície do material. O segundo acontece quando jatos de água laterais (onda Rayleigh) em alta velocidade rasgam qualquer irregularidade na superfície do material perto do local de impacto, resultando em perda de material ou nova propagação de microfissuras. A Figura 29 ilustra esses dois regimes do desgaste erosivo por impacto de gotas de água salina.

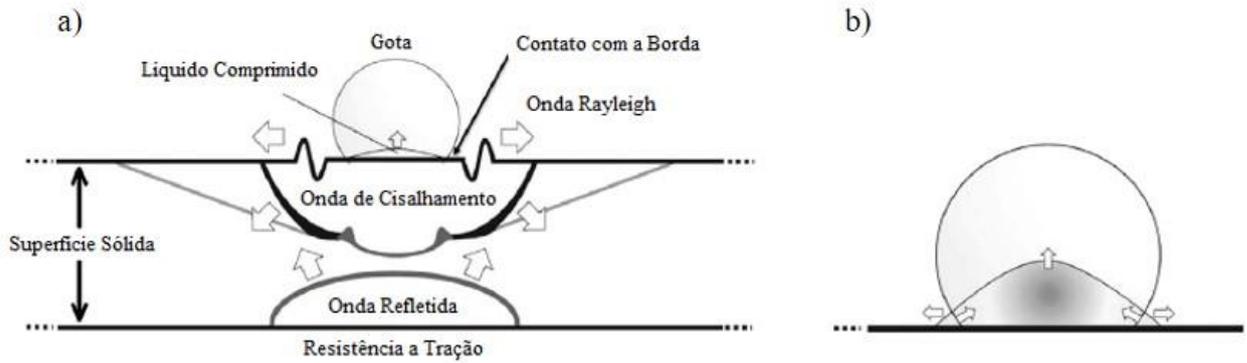


Figura 29 – Desenho esquemático do impacto de gota líquida sobre uma superfície sólida e rígida apresentando as três ondas geradas pelo impacto (a) e a deformação da gota compactada (b). Adaptado de (ZHANG; JOHANSEN; BERNAD; KIIL, 2015).

Tais mecanismos apresentados na Figura 29 indicam que os danos produzidos por uma ou mais dessas condições de carregamento em uma superfície de material são responsáveis por iniciar os danos superficiais e a posterior remoção de material. A deformação devido à erosão da gota em um local crítico sobre uma pá de turbina pode agir para agravar o fissuramento de duas maneiras: como uma concentração de estresse, fazendo com que a pá experimente altas tensões (estáticas e cíclicas), e como uma célula de corrosão estagnada, onde o ambiente na base da fissura pode alterar a concentração (pH mais baixo, ou seja, ambiente mais ácido) com prosseguimento da corrosão (MANN; ARYA, 2003).

Erosão de gotículas de água como um fenômeno de degradação de material tem sido uma preocupação em indústrias de geração de energia por décadas. Trata-se de uma combinação complicada de vários fenômenos. A pressão normal imposta, as ondas de estresse subsequente e os jatos de água laterais formados são as principais razões para danos no material alvo (ZHANG; JOHANSEN; BERNAD; KIIL, 2015). A magnitude da pressão de impacto, a área exposta a tensões e tempo de duração de cada pulso de impacto são funções do sistema tribológico existente no sistema operacional que se deseja analisar. Experimentos confirmaram que o desempenho de erosão e o mecanismo de dano causado na superfície alvo são alterados significativamente para velocidades de impacto diferentes (MAHDIPOOR; KIROLS; KEVORKOV; JEDRZEJOWSKI *et al.*, 2015).

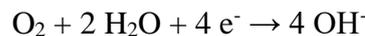
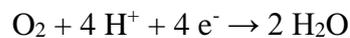
As pás de turbinas que se deparam com impacto de partículas de areia e/ou gotículas de água ou mistura de ambos, primeiro irão mostrar um aumento na aspereza de superfície que afeta o desempenho aerodinâmico negativamente, por exemplo, pelo aumento do arraste de atrito e por um início mais cedo de um estol (*stall*). Superfícies severamente desgastadas

carregam o risco de integridade estrutural reduzido, que por sua vez, resulta em tempo de inatividade da turbina e custos de manutenção elevados (SLOT; GELINCK; RENTROP; VAN DER HEIDE, 2015). Conclui-se que o desgaste erosivo é particularmente danoso para os materiais cuja resistência à corrosão depende da presença de uma camada protetora, como os alumínio, pois expõe o substrato à ação de agentes oxidantes e corrosivos, gerando uma condição de erosão-corrosão. Comumente, quando a erosão e a corrosão estão presentes em um sistema, os mecanismos de danos se reforçam mutuamente levando a uma aceleração na taxa de perda de material.

3.5 CORROSÃO POR PITE

O desgaste corrosivo pode ser definido como uma reação química ou eletroquímica, entre materiais e/ou entre um material e um meio, que produz a degradação do material e de suas propriedades (CRAMER; JUNIOR, 2003). Para metais puros e suas ligas, esta reação é decorrente da tendência natural ou espontânea que esses materiais possuem em retornar para a fase termodinamicamente mais estável, formando óxidos quando em contato com o oxigênio, por exemplo.

Do ponto de vista reacional, a corrosão normalmente envolve dois processos, um anódico, correspondendo à oxidação do metal, com produção de elétrons, e outro catódico, com consumo de elétrons e envolvendo a redução de espécies do meio, normalmente o íon H^+ ou o oxigênio dissolvido. As semirreações envolvidas poderão, assim, ser do tipo:



No caso da semirreação anódica aqui representada em primeiro lugar, a corrosão deve-se à remoção do metal como íons, mas podem também formar-se produtos sólidos sobre a superfície. Por outro lado, a corrosão pode estar aliada ou não a esforços mecânicos. Assim, frequentemente a película formada sobre a superfície metálica é removida devido à ação abrasiva de fluidos movendo-se rapidamente. Tal ação pode facilmente levar ao aparecimento de pequenas regiões anódicas em contato com grandes regiões catódicas, o que constitui uma situação especialmente perigosa.

Os alumínios apresentam taxas de corrosão menores que as apresentadas por outros materiais devido ao fato de sofrerem passivação quando são expostos à atmosfera ou outros meios oxidantes. A passivação está baseada na capacidade do material de formar uma camada de óxido superficial muito fina (alguns nanômetros), que atua como barreira de difusão e tem propriedades elétrico-químicas específicas, conseguindo diminuir as taxas de corrosão dos metais (KRUGER, 1989). A camada passiva precisa de condições termodinâmicas e cinéticas para sua formação e manutenção. Já as propriedades dessa camada de óxido estão relacionadas com sua composição química, espessura, estrutura cristalina e de defeitos, propriedades elétricas e mecânicas.

A corrosão por pite é um tipo de corrosão localizada e se desenvolve em metais que dependem de uma camada passiva para a proteção contra corrosão. Superficialmente, os pites se apresentam como pequenos furos, geralmente isolados, cujo diâmetro é menor ou igual à profundidade, ainda que a morfologia possa mudar um pouco na região subsuperficial, como se observa na Figura 30.

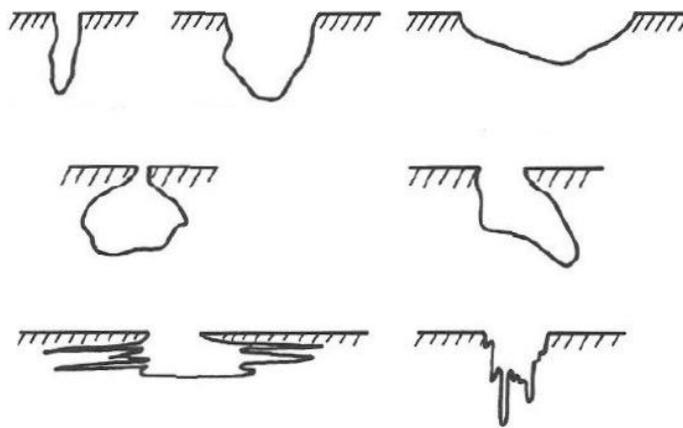
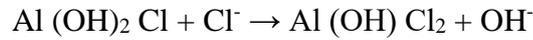
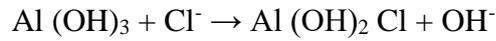


Figura 30 – Diferentes configurações de pites. (G46-94, 2013).

A corrosão por pite é induzida por íons haleto, mais comumente por íons cloreto ou o seu precursor, o íon hipoclorito ClO^- , mas também por íons brometo ou fluoreto.

A formação de um pite inclui dois processos, um de nucleação e outro de crescimento (FERNANDES, 1997). Durante a nucleação o íon cloreto é adsorvido nas camadas de óxido/hidróxido presentes no alumínio, penetrando até o substrato em pontos de defeito do filme, onde este não existe ou é mais facilmente dissolvido. Há quem postule que o ataque do

filme ocorre por substituição dos íons hidróxido por íons Cl^- , dando origem a hidroxicloretos ou cloretos solúveis:



A formação destes oxicloretos ou cloretos solúveis no interior de pequenas zonas dá origem a uma solução extremamente agressiva, de baixo pH e que resulta da hidrólise desses mesmos cloretos:



Desta forma, o ambiente extremamente corrosivo que se forma nestas zonas estabiliza-as como zonas anódicas, promovendo a sua continua dissolução, enquanto os processos catódicos passam a dar-se preferencialmente nas zonas não atacadas do filme passivo. De fato, como a solubilidade do oxigênio em soluções concentradas é muito baixa, a reação de oxigênio não se apresenta dentro do pite, portanto, deve continuar acontecendo nas regiões que o rodeiam e esta reação protege a superfície. Assim, o pite se forma em uma pequena área onde a camada passiva apresenta algum defeito, sendo que ao redor a superfície permanece intacta. Em decorrência, a área afetada torna-se uma região anódica rodeada de áreas catódicas. As células ativas/passivas assim criadas estimulam o ataque nas áreas anódicas e o crescimento dos pites, bem como determinam a aparição de um padrão de ataque discreto distribuído na área inteira da superfície metálica.

Uma vez nucleado o pite, pode repassar, assim como pode crescer promovendo a perfuração do material, tornando a peça não utilizável ou gerando uma falha catastrófica. O processo de crescimento é esquematizado na Figura 31.

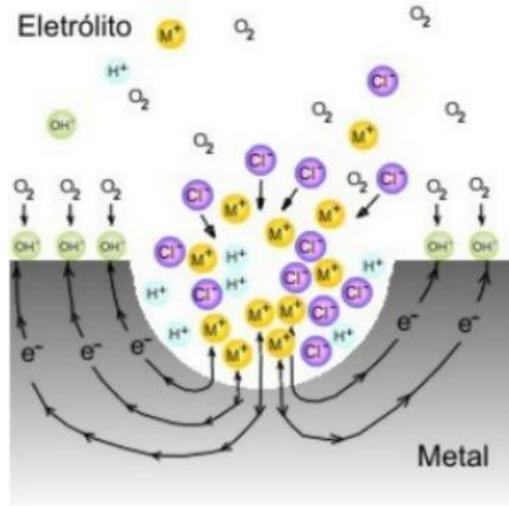
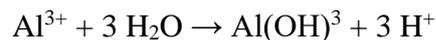


Figura 31 – Esquema do processo de formação de um pite na superfície de um metal. (FONTANA; GREENE, 1986).

O crescimento do pite acontece por um processo autocatalítico, no qual a reação anódica de corrosão dentro do pite produz as condições necessárias para o seu próprio crescimento. De fato, as condições de elevada acidez dentro do pite levam à intensificação do processo de dissolução anódica, com produção de íons Al^{3+} . Estes, por sua vez, reagem com a água, formando hidróxidos e íons H^+ , que conduzem a uma maior redução do pH, segundo a reação:



Por outro lado, o excesso de cargas positivas dentro do pite atrai íons negativos vindos do exterior que restauram a neutralidade de carga na região. Entre estes estão os íons cloreto, que vão tornar ainda mais agressivo o meio no interior do pite.

Para além do efeito de possíveis contaminações de gases reativos (ácido clorídrico, gases orgânicos contendo cloro), as fontes exteriores de cloretos mais comuns em atmosferas são partículas de aerossóis ou partículas que precipitam a partir de cloretos da água do mar.

Dessa forma, as pás das turbinas OWC podem sofrer corrosão por pite em contato com a água do mar e a atmosfera marinha. Além da composição do eletrólito, outras variáveis como temperatura e velocidade também afetam a resposta do material. O pite é associado normalmente a condições de estagnação e, em princípio, o aumento da velocidade do eletrólito diminui o ataque por pite. Por outro lado, a corrosão por pite pode ser alterada significativamente pela composição química do material e por características metalúrgicas da

superfície, como a presença de fissuras, dado que essas atuam como locais preferenciais para a iniciação do pite (JONES, 1992). Em geral, todos os filmes de óxidos no alumínio e suas ligas contêm defeitos de dois tipos: 1) residuais, causados pela presença de partículas de precipitados segregados no filme e 2) mecânicos, tais como riscos e vazios devidos à coalescência de lacunas.

Monitorar a corrosão por pite é uma tarefa complicada, pois os pites formados são de difícil visualização, a perda de massa associada por pites é desprezível e a velocidade de crescimento muito rápida, além de haver uma tendência de serem encobertos por depósitos. A profundidade, a densidade de pites e o tamanho superficial podem ser comparados com tabelas-padrão, conforme Figura 32.

| | A | B | C |
|---|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | Densidade | Tamanho | Profundidade |
| 1 |  $2.5 \times 10^3 / m^2$ |  $0.5 mm^2$ |  $0.4 mm$ |
| 2 |  $1 \times 10^4 / m^2$ |  $2.0 mm^2$ |  $0.8 mm$ |
| 3 |  $5 \times 10^4 / m^2$ |  $8.0 mm^2$ |  $1.6 mm$ |
| 4 |  $1 \times 10^5 / m^2$ |  $12.5 mm^2$ |  $3.2 mm$ |
| 5 |  $5 \times 10^5 / m^2$ |  $24.5 mm^2$ |  $6.4 mm$ |

Figura 32 – Padrão de comparação para a densidade, tamanho e profundidade de pites. (JONES, 1992).

A análise de corrosão por pite na pá da turbina do Pico e nos corpos-de-prova confeccionados nesse trabalho foi por meio de uma das principais técnicas para análise de corrosão, a EIE - Espectroscopia de Impedância Eletroquímica, podendo ou não ser realizada em conjunto com a técnica de polarização cíclica para uma avaliação mais completa. Pode-se dizer que o princípio da técnica de EIE consiste em aplicar uma perturbação, um sinal alternado de potencial (ΔE), normalmente do tipo senoidal, com uma dada frequência f e de pequena amplitude (5 a 20 mV), a um eletrodo inserido em um eletrólito. Este responderá através da passagem de corrente (ΔI), também senoidal e com a mesma frequência f , porém com uma diferença de fase Φ em relação ao sinal aplicado (BROOMFIELD, 1987). A

impedância, que se representa por Z , é dada pela razão entre a perturbação de potencial (ΔE) e a resposta de corrente (ΔI).

Em um ensaio de EIE, faz-se a determinação da impedância de um dado sistema para uma larga gama de valores de frequência. Isso pode ser feito nos domínios de tempo ou nos domínios de frequência, utilizando-se um analisador de espectro ou um analisador de resposta de frequência, respectivamente.

As principais vantagens desta técnica são:

- a) fornece informações sobre a cinética do processo, pela velocidade de corrosão;
- b) apresenta precisão e reprodutibilidade apropriada para ambientes de alta resistividade;
- c) fornece dados sobre o mecanismo de controle eletroquímico, indicando, por exemplo, se o processo corrosivo se dá por ativação, concentração ou difusão;
- d) caracteriza o estado e a morfologia da corrosão;
- e) técnica não destrutiva e não perturbativa, uma vez que sinais aplicados são de pequena amplitude, de forma que o potencial de corrosão não é alterado;
- f) permite o acompanhamento da evolução do estado passivo ou ativo ao longo do tempo.

A impedância pode ser traduzida por um número complexo, do tipo $Z = Z' + jZ''$. Como tal, pode ser representada através das suas coordenadas retangulares, parte real e parte imaginária. Uma representação deste tipo, com pontos correspondentes às diferentes frequências ensaiadas, é chamada de “diagrama de Nyquist”. Outra possível representação é a que utiliza as coordenadas polares, sendo chamada de “diagrama de Bode”, apresentando o logaritmo do módulo da impedância ($\log|Z|$) e o ângulo de fase como função do logaritmo da frequência.

O diagrama de Nyquist, também conhecido como representação de Argand ou Cole-Cole, consiste em uma série de pontos, cada um representando a grandeza e a direção do vetor de impedância para uma frequência em particular (WOLYNEC, 2003). O diagrama é um plano complexo (real imaginário) de coordenadas cartesianas, em que se tem na abscissa a parte real (termos resistivos) e na ordenada a parte imaginária (termos capacitivos ou indutivos). Os dados de impedância representados no plano cartesiano sob uma larga variação de frequência (100 KHz a 10 mHz; em geral 10 KHz a 10^{-4} Hz) gera configurações típicas, de acordo com o mecanismo eletroquímico predominante.

Uma vez construído o diagrama de Nyquist, faz-se a extrapolação da parte direita do semicírculo até encontrar o eixo horizontal. O diâmetro do semicírculo é a resistência à transferência de carga R_t , equivalente à resistência de polarização (R_p) (BROOMFIELD, 1987). Assim, quanto maior o diâmetro deste semicírculo, maior a resistência R_p e, conseqüentemente, menor a taxa de corrosão (AGUILAR; SAGÜÉS; POWERS, 1990).

O diagrama de Bode consiste em um plano de eixos ortogonais, nos quais se têm, no eixo das ordenadas, duas grandezas: o logaritmo da impedância ($\log|Z|$) e o ângulo de fase (Φ) em graus; e no eixo das abscissas, tem-se o logaritmo da frequência ($\log f$), com f em Hz, ou o logaritmo da frequência angular ($\log \omega$), com ω em radianos por segundo (rad/s). Com a configuração $\log \omega$ versus $|Z|$, pode-se determinar R_ω e R_t , e por meio de ângulo da fase versus $\log \omega$, é possível a determinação da capacitância da dupla camada elétrica C_{dl} .

No diagrama de Bode, distingue-se claramente a região de alta frequência, caracterizada pela presença de películas de passivação e de outros tipos de revestimentos, a região de frequência média, que reflete a mudança de condutividade elétrica do revestimento durante exposição em meio corrosivo e, finalmente, a região de baixa frequência, onde a reação de corrosão na interface metal/revestimento pode ser estudada (BROOMFIELD, 1987).

O conceito básico envolvido em EIE é que uma interface pode ser vista como uma combinação de elementos de circuito elétricos passivos, isto é, resistência, capacitância e indutância. Desta forma, um dado sistema eletroquímico poderá ser caracterizado pelo seu circuito elétrico equivalente, em que cada elemento representa um processo físico concreto que ocorre no sistema real, sendo possível a sua quantificação. Um dos maiores problemas em se utilizar circuitos equivalentes é decidir que circuito equivalente específico, entre tantas possibilidades, deverá ser utilizado.

Um processo corrosivo envolve, simultaneamente, diversos processos físicos e, portanto, o seu circuito equivalente será composto por diferentes elementos de circuito. Como exemplo, dois circuitos equivalentes são apresentados na Figura 33, um correspondente ao comportamento de um material passivo (como alumínio) com uma camada de óxido de proteção preservada e o outro para o caso de material passivo com ataque por pite. No primeiro caso, o comportamento da impedância do material é simulado simplesmente através de um circuito equivalente elétrico que compreende dois resistores e um capacitor. A transferência do elétron através da película passiva é representada pela resistência $R_{óxido}$ e o

comportamento dielétrico de tal película é representado pela capacidade correspondente $C_{\text{óxido}}$, em um arranjo paralelo. Já a resistência do eletrólito é simulada por a resistência R_s , em série com as contribuições do filme (Figura 33a).

O aparecimento de corrosão por pite corresponde ao ataque localizado do filme passivo, formando cavidades onde um ambiente muito agressivo impede que o material seja passivado. O correspondente circuito elétrico equivalente é então constituído pelas contribuições paralelas do filme passivo remanescente e dos processos interfaciais na interface metal/eletrólito (dentro dos pites). A película passiva poderia ser representada outra vez por um arranjo paralelo de $R_{\text{óxido}}$ e de $C_{\text{óxido}}$, mas, porque o óxido de alumínio é um isolante, o valor de $R_{\text{óxido}}$ é normalmente assim elevado, comparado aos outros processos, que pode ser considerado como o infinito, correspondendo a um circuito aberto, de modo que este resistor pode ser descartado.

A contribuição da área de pite é representada por um capacitor, correspondendo à dupla camada eletroquímica, e uma associação de um resistor (resistência de transferência de carga) e um elemento de Warburg, correspondendo às limitações de transporte de massa (processos de difusão) que se tornam importantes nas altas taxas de oxidação encontradas no interior dos pites. Devido à alta relação de profundidade/diâmetro dos pites, um resistor R'_s , também é considerado, representando a resistência da solução adicional no pite. O circuito elétrico total equivalente para o alumínio em condições de corrosão é o apresentado na Figura 33b.

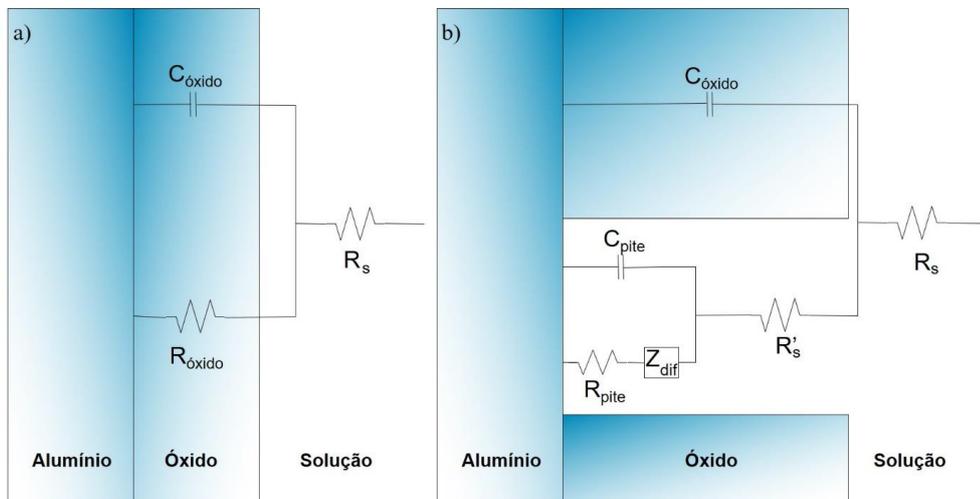


Figura 33 – Circuitos elétricos equivalentes para o alumínio passivo (a) e para o alumínio com ataque por pite (b). Adaptado de (MANSFELD; FERNANDES, 1993).

Os dois circuitos da Figura 33 conduzirão a padrões bastante diferentes em um diagrama de Nyquist ou Bode e, é claro, conduzirão a valores diferentes dos parâmetros correspondentes, permitindo, no presente estudo, distinguir entre um material desgastado mecanicamente, com renovação do seu filme passivo, portanto onde o ataque de corrosão não tem um papel fundamental, e uma situação em que os aspectos corrosivos, ou seja, os efeitos químicos/eletroquímicos impulsionados pelo meio ambiente, são responsáveis pela degradação observada.

Apesar do uso extensivo da liga de alumínio 5052, praticamente não se encontra na literatura artigos relevantes com informação sobre a sua corrosão atmosférica ou por pite (ANAS; ABIOYE; ANASYIDA; DHINDAW *et al.*, 2019; DARMAWAN; SISWANTO; PURBOPUTRO; ANGGONO *et al.*, 2019; LOCKWOOD; LEE; FAUNCE; GREEN *et al.*, 1985; RANGEL; SOUZA; SCHREINER; FREIRE *et al.*, 2010), o que deve explicar-se pelo seu excelente comportamento neste domínio. Da mesma forma, poucos artigos foram encontrados sobre a aplicação de espectroscopia de impedância eletroquímica a esta liga, ou, pelo menos, em condições de exposição a ambientes marinhos.

3.6 SINERGISMO

Nos subcapítulos 3.4 e 3.5, onde inicialmente foram abordados o desgaste de um material, vimos que ele é definido como o processo no qual ocorre dano superficial causado por uma interação com outra superfície, corpo ou fluido. Nesta interação atuam os chamados mecanismos de desgaste, que envolvem uma série de fenômenos físicos e químicos. Este processo não é apenas uma propriedade do material, ele é uma resposta integral do tribo-sistema em questão. Quando existe um movimento relativo entre superfícies, o desgaste não pode ser completamente eliminado, ainda que, em alguns casos, possa ser reduzido a níveis insignificantes. Há pelo menos três maneiras de se classificar o desgaste:

- a) aparência da cicatriz: consiste na comparação de uma situação de desgaste com outras. Como por exemplo riscado, com pite, polido etc.;
- b) condições que envolvem a situação de desgaste: consiste em identificar o desgaste segundo as suas condições macroscópicas. Tais como desgaste lubrificado, desgaste a seco, desgaste metal-metal, em alta temperatura etc.;
- c) mecanismos físicos de remoção de material: classifica segundo os agentes causadores de danos, como exemplo tem-se a adesão, abrasão, oxidação. Esta última é,

certamente, a mais difundida. Ela permite projetar a resistência do componente exposto ao desgaste e identifica os parâmetros envolvidos (carga, geometria, velocidade e ambiente), permitindo as possíveis modificações dos mesmos.

A identificação do mecanismo de desgaste presente se dá pelo estudo da tribologia a partir da inspeção visual do componente desgastado, auxiliada por microscopia óptica se necessário, e por coleta de dados do tribo-sistema em que este está inserido (avaliação da pressão, temperatura, rotação, materiais de fabricação, lubrificação, rugosidade, etc. por exemplo). O processo de desgaste é considerado complexo, pode envolver mecanismos de forma independente ou combinada. Com relação aos mecanismos suspeitos por resultarem no desgaste acentuado nas pás da turbina da COP, destacam-se:

- a) desgaste por corrosão: desgaste ocasionado pela deterioração do metal através de reações químicas com o meio em que está inserido;
- b) desgaste por erosão: partículas carregadas por um fluido em movimento promovem a remoção de material da superfície de contato. O fluido também pode gerar a erosão, a exemplo da cavitação, erosão causada por bolhas de ar presentes em fluxos turbulentos de água.

Erosão-corrosão é um termo geral que abriga um amplo espectro de interações entre mecanismos químicos, eletroquímicos e mecânicos, que vão desde a corrosão acelerada até o dano puramente mecânico. A ação combinada desses processos pode resultar em uma interação mútua, significativamente maior do que as contribuições individuais da corrosão e do desgaste isolados, resultando no fenômeno chamado de sinergismo positivo erosão-corrosão (G119-09, 2016).

A interpretação do comportamento erosão-corrosão requer um conhecimento detalhado da cinética de erosão e de corrosão. No caso de existir um efeito sinérgico, é importante esclarecer se é devido ao efeito da erosão sobre a corrosão (a camada passiva é removida completamente e o dano mecânico do metal base é o mecanismo dominante), ou um efeito da corrosão sobre a erosão (a camada passiva pode ter uma espessura de equilíbrio, que é função da taxa de transferência de massa e da cinética de crescimento que é controlada pela dissolução da camada protetora) ou ainda se ambos agem na mesma intensidade.

Assim, observam-se fenômenos de gradações diferentes, como:

- a) a camada passiva é removida, porém pode ocorrer repassivação e então a taxa de erosão-corrosão é a função da frequência da remoção do filme, da dissolução do material base e da taxa de repassivação posterior;
- b) a camada passiva é removida e não se forma novamente e, então, a taxa de erosão-corrosão é a taxa em que o metal base pode se dissolver;
- c) a camada é passiva removida e a superfície do metal base é danificada mecanicamente, o que contribui para a perda de massa e então a taxa de erosão corrosão é igual à taxa de dissolução do metal base mais o possível efeito sinérgico com o dano mecânico.

A perda de material em um ambiente específico depende de muitos fatores inter-relacionados que incluem as propriedades e as estruturas dos materiais envolvidos, as propriedades físicas e químicas das partículas e do meio ambiente. Algumas das características mais importantes do tribo-sistema que sofre erosão e/ou corrosão são apresentadas na Tabela 8. Essa variedade de fatores que afeta o comportamento do tribo-sistema faz com que o modelamento preditivo das taxas de perda de material submetido à erosão-corrosão seja ainda mais complexo, sendo necessária a criação de modelos específicos, que são úteis somente quando utilizados nas mesmas condições em que foram determinados.

Tabela 8 – Alguns parâmetros importantes dos componentes do tribo-sistema submetido a erosão ou à corrosão.

| ELEMENTO | EROSÃO | CORROSÃO |
|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| Fluido | Velocidade de impacto; Ângulo de incidência; Viscosidade; Líquido ou gás. | Composição química (pH); Temperatura; Condição de fluxo; Condutividade elétrica. |
| Partículas | Concentração de partículas; Forma; Angulosidade; Tamanho; Tenacidade; Dureza. | |
| Superfície e sub-superfície | Dureza; Ductilidade; Tenacidade; Microestrutura; Resistência ao impacto; Resiliência; Encruamento; Composição química; Temperatura. | Microestrutura; Gradientes de composição; Qualidade superficial. |

O modelamento de processos de erosão-corrosão tem os mesmos problemas mencionados anteriormente para a erosão, especialmente um grande número de variáveis cuja importância pode variar enormemente, dependendo das particularidades do sistema, o que impede a formulação de um modelo geral que dê conta de explicar todas as observações e os dados experimentais.

O principal mecanismo responsável pelo dano de ligas metálicas que sofrem passivação, quando submetido às solicitações que envolvem erosão e corrosão é a contínua remoção de camadas passivas, como mostra esquematicamente a Figura 34. A remoção contínua da camada passiva por efeito erosivo e o seu novo crescimento constituem uma forma muito mais eficiente de perda de material do que quando o material é simplesmente submetido à corrosão sem erosão. A corrosão também pode aumentar devido à criação de uma célula galvânica entre a pequena porção da superfície sem filme, que se torna anódica, e o resto da superfície (catódica). Entretanto, se a carga erosiva se intensifica e/ou o filme protetor torna-se muito fino, o substrato irá sofrer mais com a ação mecânica e a erosão-corrosão pode se tornar erosão pura.



Figura 34 – Esquema ilustrativo do mecanismo de remoção da película passiva por ação mecânica de partículas abrasivas. (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2005).

Por outro lado, vários fatores decorrentes da erosão podem aumentar a magnitude da corrosão, tais como: a área superficial das marcas de desgaste, a deformação plástica na região do contato, a remoção das camadas passivas e sulfatadas e os efeitos da agitação no eletrólito, como resultado do movimento (STOTT; BREAKELL; NEWMAN, 1990).

Quando a integridade do material é afetada pela ação do ambiente externo, pode se tornar necessário protegê-lo, sendo a aplicação de revestimento a rota mais apropriada para proteger as superfícies metálicas. Para isso, o conhecimento do mecanismo controlador do processo de dano do material passa a constituir uma informação útil para a seleção do material mais adequado e para a prevenção da erosão-corrosão em um determinado sistema tribológico.

3.7 ASPERSÃO TÉRMICA

A aspersão térmica consiste em um grupo de processos por meio dos quais se deposita, sobre uma superfície previamente preparada, camadas de materiais metálicos ou não metálicos. Essa sobreposição de camadas forma o que é chamado de revestimento protetor, que tem por finalidade a proteção de conjuntos e componentes mecânicos, elevando suas resistências ao desgaste, à corrosão, a variações de temperatura e de eletricidade e contra incompatibilidades químicas e biológicas. Dessa forma, o desenvolvimento da tecnologia de aspersão térmica baseia-se na ciência dos materiais, com o desenvolvimento de ligas específicas para resistir às mais diversas condições de serviço, tendo por objetivo final aumentar a vida útil e o desempenho de sistemas e peças.

Nos processos de aspersão térmica, os materiais, inicialmente na forma de pó, arame ou vareta, são forçados a passar por uma região de elevada temperatura decorrente de uma fonte de calor (bico da pistola de aspersão), onde atingem um estado fundido ou semifundido. Tais materiais, agora na forma de partículas, são acelerados por gases sob pressão contra a superfície do substrato que será revestido. As partículas deformam-se durante a colisão, aderindo-se ao material base e, na sequência, sobre as próprias partículas já depositadas, formando camadas. Os revestimentos obtidos têm espessuras que vão de micrômetros a milímetros.

Existem vantagens e desvantagens de se utilizar o processo de aspersão térmica. Dentre as principais vantagens, pode-se citar que qualquer material capaz de fundir, sem se decompor pode ser usado. Trata-se de um processo alternativo, sem gerar impactos ambientais, aos outros processos tradicionalmente implantados, como a aplicação de cromo duro eletrolítico, por exemplo. Além disso, pode-se aplicar revestimentos em qualquer substrato, pois é possível um bom controle da temperatura durante o processo de deposição. Por outro lado, uma desvantagem do ponto de vista operacional é que a deposição é feita diretamente da pistola de aspersão, somente sobre o que a pistola pode direcionar a aspersão de partículas. Naturalmente, existem limitações de tamanho, sendo impossível recobrir pequenas e/ou profundas cavidades na qual a tocha ou pistola não possa se ajustar (TECHNOLOGY, 2004). Os processos de aspersão térmica são agrupados de acordo com a fonte de energia, química ou elétrica, como apresenta a Figura 35.

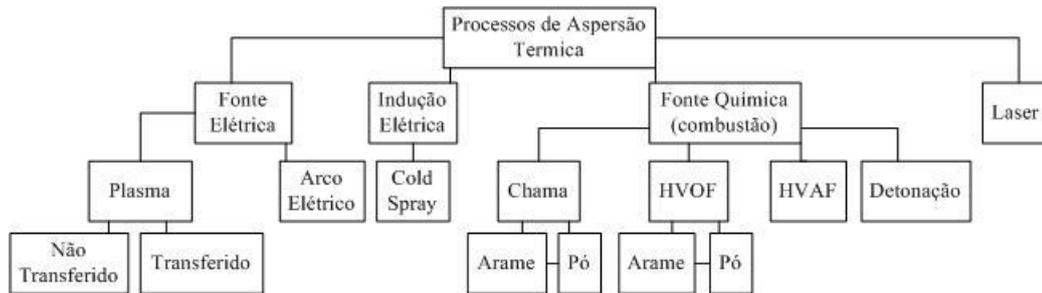


Figura 35 – Processo de aspersão térmica em função da fonte de calor.

A microestrutura típica de revestimentos obtidos por aspersão térmica é apresentada na Figura 36. Ao colidirem contra o substrato, as partículas aspergidas tornam-se aplainadas e aderem às irregularidades da superfície que encontram, formando uma estrutura lamelar com poros, partículas não fundidas e inclusões de óxidos (no caso de revestimentos com metais). A ligação entre o depósito aspergido e o substrato pode ser mecânica, metalúrgica, química, física ou uma combinação destas formas (LIMA; TREVISAN, 2007).

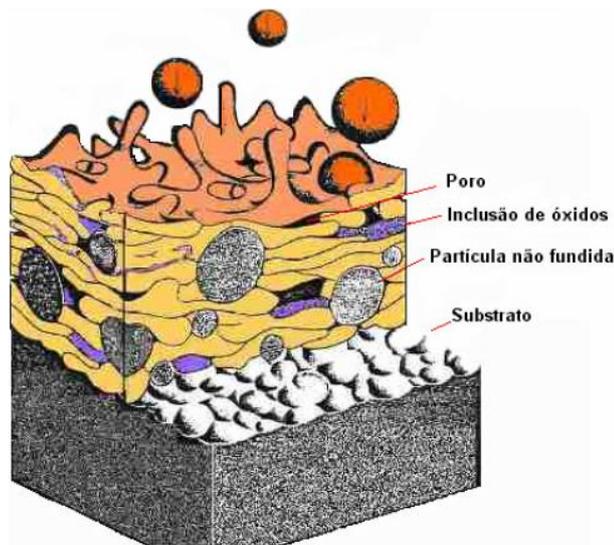


Figura 36 – Microestrutura típica de revestimentos aspergidos termicamente. Adaptado de (ENGLAND).

Para obter uma aderência adequada ao substrato, esse deve ter um alto grau de limpeza, que é alcançada por meio de jateamento abrasivo, o qual também provoca uma determinada rugosidade, que conduz as partículas do revestimento ao ancoramento mecânico no momento do impacto. Além disso, fatores como o pré-aquecimento e o resfriamento do substrato após a aspersão também exercem influência na aderência.

Com altas temperaturas no substrato, aumenta a difusão entre as partículas das camadas, mas também aumenta a oxidação do substrato, o qual poderá diminuir a coesão entre as partículas. Através de alta velocidade das partículas, conjugada a um pequeno tamanho de grão, produzem microestruturas mais finas e lamelas mais estreitas com melhor ligação entre estas (NIEMI; VUORISTO; MANTYLA; LUGSCHEIDER *et al.*, 1995).

As propriedades físicas do revestimento são determinadas a partir do dinamismo da deformação das partículas colidindo com o substrato, da reação de resfriamento do contato e das interações desses contatos com a superfície. A gotícula espalha-se e resfria-se dependendo do tamanho da partícula no estado de fusão, rugosidade, temperatura e reatividade da superfície (VARDELLE; VARDELLE; LEGER; FAUCHAIS *et al.*, 1995).

A seleção de materiais e o tratamento de superfícies são medidas utilizadas para a minimização dos mecanismos de desgaste. Para definir a técnica de aspersão térmica adequada e quais os possíveis materiais para revestimento, é de fundamental importância identificar os fenômenos tribológicos que estão ocasionando o desgaste superficial do componente que se deseja realizar aplicação de revestimento. Por esta razão, tratamentos para desgaste com aplicação de revestimentos protetores são superficiais, sem modificar as propriedades globais do componente e sem custos exagerados.

No caso da problemática dessa pesquisa, ocorreu dano superficial nas pás da turbina da COP causada por uma interação que não é apenas dependente do material utilizado na sua fabricação, mas sim uma resposta integral do tribo-sistema em questão. A definição do mecanismo de desgaste erosivo-corrosivo facilitou a escolha do tratamento térmico e do revestimento contra desgaste a ser aplicado na superfície da peça.

Quanto a técnica de aspersão, sabe-se que poros tendem a enfraquecer o material pela concentração de tensões que proporcionam e, conforme seu tamanho, forma e localização, influenciam diretamente na resistência mecânica do material. Muitas propriedades, além da resistência mecânica, são fortemente dependentes da forma do poro e da sua distribuição. Portanto, a escolha da técnica de aspersão térmica por HVOF - *High Velocity Oxy-Fuel* (também denominada por aspersão térmica hipersônica) foi realizada por ser capaz de fornecer revestimentos mais densos e com menor porosidade, tornando-se importante para alcançar a proteção desejada das pás da turbina OWC-WEC. Em particular, a baixa porosidade permite evitar possíveis fenômenos de corrosão galvânica se o revestimento for mais nobre do que o substrato.

3.7.1 HVOF – High Velocity Oxy-Fuel

A tecnologia de aspersão térmica por HVOF é bastante conhecida por fornecer grande variedade de materiais para revestimento, com características de excelente desempenho sob diferentes condições agressivas, inclusive desgaste por erosão e corrosão (PEAT; GALLOWAY; TOUMPIS; HARVEY *et al.*, 2016). A densidade e a dureza de revestimentos produzidos dessa maneira são tipicamente superiores a outros processos de aspersão térmica (PEAT; GALLOWAY; TOUMPIS; HARVEY *et al.*, 2016).

A queima do combustível com oxigênio ocorre dentro de uma câmara na pistola de aspersão. Os combustíveis mais comumente empregados são querosene e hidrogênio. Devido à elevada pressão dentro da câmara de combustão, a expansão dos gases pode levar as partículas injetadas na chama a velocidades acima de 2000 m/s com a chama atingindo temperaturas de até 2600 °C. A Figura 37 apresenta esquematicamente o processo de aspersão térmica HVOF.



Figura 37 – Representação esquemática do processo de aspersão térmica hipersônica. Adaptado de (ENGLAND).

Devido às moderadas temperaturas de operação empregadas no processo hipersônico, partículas maiores do que um determinado tamanho crítico não fundem completamente. Portanto, a homogeneidade de distribuição granulométrica é um fator primordial para a obtenção de revestimentos com alta qualidade. Os revestimentos obtidos apresentam elevada aderência, densificação e baixa tensão residual na camada do revestimento (FILLION, 1995).

A tecnologia HVOF permite a produção de revestimentos com uma velocidade média mais elevada e uma temperatura média menor que outros processos de aspersão térmica (TOMA; BRANDL; MARGINEAN, 2001). Este fato produz uma significativa menor

oxidação de partícula de material no estado semifundido durante o processo de recuperação, o que gera uma maior resistência de corrosão do revestimento, permitindo também menor quantidade de transformação de fase, revestimentos mais densos e com menor porosidade (COSTA; VENDITTI; VOORWALD; CIOFFI *et al.*, 2009).

Entretanto, o sucesso de um revestimento está relacionado com a seleção criteriosa de materiais para várias aplicações. A dureza, a densidade e o conteúdo de óxidos dos revestimentos são parâmetros importantes a serem considerados para aplicações que trabalham em ambientes agressivos de erosão-corrosão. É também fundamental que sejam analisadas as mudanças superficiais causadas por um ambiente ou por uma condição de trabalho para determinar a seleção do material para o revestimento e o processo de aplicação, sendo importante, ainda, garantir elevada aderência, baixa porosidade, facilidade de deposição e custo adequado comparado com outras técnicas de proteção de materiais.

Ao consultar registros históricos da COP observou-se que, durante a seleção do material utilizado para a fabricação das pás da turbina, alguns possíveis efeitos do sistema tribológico atuante durante sua operação não foram considerados, como é o caso da erosão por impacto de gotas de água do mar e eventuais particulados sólidos. Dessa forma, como alternativa ao incremento de durabilidade nas pás da turbina da COP, que sofreram degradação por sinergismo de desgaste por erosão-corrosão, a deposição de um material como o carboneto de tungstênio-cobalto-cromo – WC-CoCr é recomendada por ser altamente resistente à abrasão, erosão e desgaste por deslizamento em baixa temperatura e ter excelente resistência à corrosão.

3.7.2 Carboneto de tungstênio-cobalto-cromo – WC-CoCr

O carbono forma compostos binários com vários elementos, denominados carbonetos, que, como uma família, constituem um segmento grande de materiais utilizados pela indústria de pulverização térmica a fim de beneficiar tanto a dureza da cerâmica, proporcionando uma alta resistência ao desgaste, como a propriedade do metal em resistir ao ataque por corrosão. Dessa forma, o WC-CoCr é um Cermet, isto é, um cerâmico de fase dura (WC) disperso em uma matriz metálica CoCr como aglutinante mais macio, uma combinação de alta dureza e boa resistência à corrosão que permite um melhor desempenho em comparação com muitos materiais metálicos. Os carbonetos empregados no revestimento por HVOF apresentam-se na forma de pós (Figura 38).

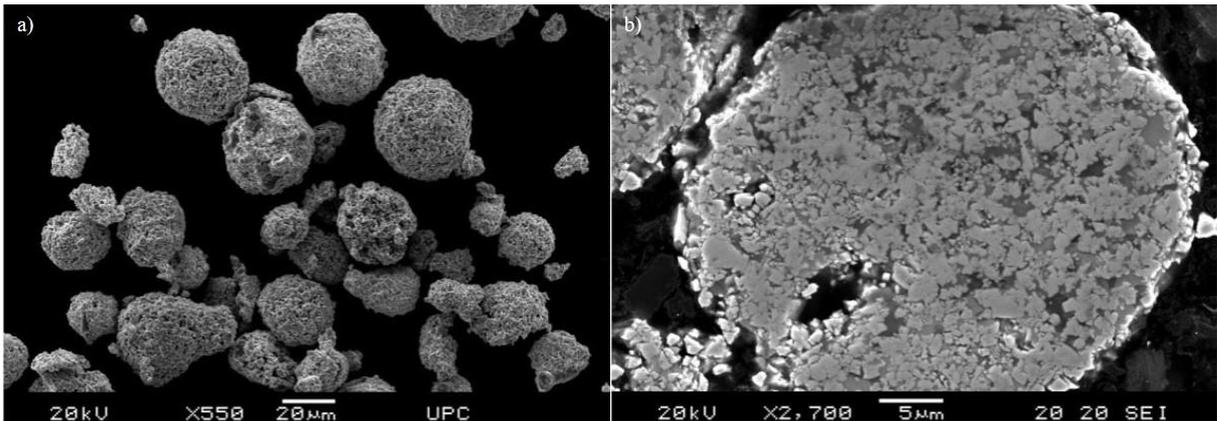


Figura 38 – Imagens SEM de pó WC-CoCr: morfologia dos pós (a) e microestrutura transversal (b). (PICAS; PUNSET; BAILE; MARTÍN *et al.*, 2009)

O carboneto de tungstênio (WC) tem ótimas propriedades de resistência ao desgaste, geralmente para combater a erosão e corrosão (MANN; ARYA, 2003). Em aplicações onde a resistência ao desgaste erosivo é de primordial importância, WC-Co é usado. A elevada dureza (3000-4000 HV) é ditada sobretudo pelas partículas de WC enquanto o material aglomerante Co tem a função de ligar as partículas duras (carbonetos) e conferir tenacidade ao composto. Quando há também uma demanda elevada de resistência à corrosão, pós de WC-CoCr são preferidos. A resistência à erosão depende de óxidos e poros e da transformação de fase que ocorrem durante a pulverização.

A elevada resistência à erosão e as elevadas taxas de encruamento que as ligas à base de cobalto apresentam podem dever-se à transformação de fase de γ -Co, com estrutura cristalina fcc, para ϵ -Co hexagonal compacta (hcp), estrutura termodinamicamente mais estável. Por conseguinte, e dependendo dos elementos de liga presentes (W, Cr e Mo), a energia de falha de empilhamento (E.F.E.) da estrutura diminui (de 50 para 20 mJ m^{-2}), promovendo uma maior aproximação das deslocações de modo a minimizar o defeito de empilhamento. A Tabela 9 apresenta um resumo de características do revestimento WC-CoCr (1350V 86% WC 10% Co e 4% Cr) da Praxair Surface Technologies do Brasil Ltda, utilizado nessa pesquisa (ver anexos II e III).

Tabela 9 – Algumas características obtidas com aplicação de revestimento por HVOF de WC-CoCr.

| Variáveis | Valores |
|--------------------------------|----------------|
| Microdureza | 1200 a 1350 HV |
| Porosidade | <1% |
| Temperatura máxima de trabalho | 450 °C |
| Resistência à névoa salina | >4000 horas |
| Adesão | >10000 PSI |
| Camada máxima | 1,5mm |

O revestimento WC-CoCr depositado por HVOF, como é observado na Figura 39, apresenta alta fração volumétrica de carbonetos, associada à baixa descarbonetação. Percebe-se claramente uma alta retenção de WC primários com pequenas quantidades de Co e Cr entre os carbonetos, levando ao aumento da fração volumétrica do ligante. A distribuição mais homogênea dos carbonetos influencia diretamente o livre caminho médio entre eles, que juntamente com o menor o tamanho dos carbonetos influencia diretamente a resistência à erosão. A dureza do revestimento no carboneto de tungstênio-cobalto-cromo, por vezes, é atribuída à capacidade da matriz de cobalto em reter as partículas de carboneto duro (PEAT; GALLOWAY; TOUMPIS; HARVEY *et al.*, 2016). A presença de carbonetos de menor tamanho, conseqüentemente, proporciona boa compactação, o que contribui para diminuição do dano erosivo das superfícies subjacentes com revestimento WC-CoCr (PEAT; GALLOWAY; TOUMPIS; HARVEY *et al.*, 2016). A elevada densidade e a baixa porosidade destes revestimentos, especialmente se obtidos por HVOF, são características muito fortes da microestrutura resultante dessa combinação, independentemente das variáveis de processos do jateamento HVOF utilizadas (PICAS; PUNSET; BAILE; MARTÍN *et al.*, 2009).

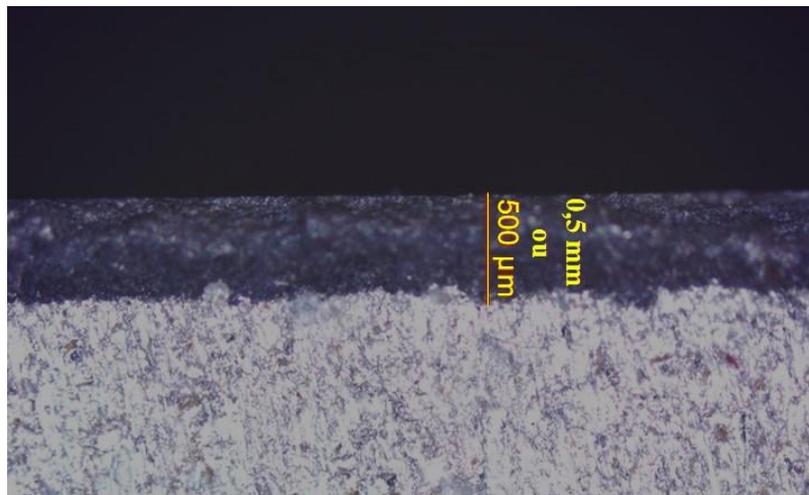


Figura 39 – Micrografia (10x) de uma seção em corte de um corpo-de-prova de alumínio A356.0 T6/AlSi₇Mg_{0,3} revestido por WC-CoCr através da técnica de dispersão térmica HVOF.

As características do revestimento WC-CoCr obtidos por HVOF contribuem também para sua durabilidade em relação a fadiga de superfície como mecanismo de desgaste por danos de erosão, pois para minimizar os efeitos de fadiga de superfície é recomendado o desenvolvimento de revestimentos com foco na redução da pressão de impacto, por exemplo, com um baixo módulo de elasticidade, elevada dureza, ou sem defeitos e impurezas (boa adesão e baixa porosidade) (SLOT; GELINCK; RENTROP; VAN DER HEIDE, 2015).

Por outro lado, o fato de a resistência à corrosão deste revestimento resultar da formação de um filme passivo de óxidos (Figura 40), normalmente com baixa afinidade para a ocorrência de reações catódicas (ao contrário de metais nus) o torna especialmente adequado à proteção de substratos menos nobres (caso do alumínio). Em geral, quando um revestimento é mais nobre do que o substrato, a existência de poros levará à corrosão acelerada do substrato, onde ocorrerá a reação anódica (de corrosão), enquanto a reação catódica se localiza no revestimento. Desta forma, convém que o revestimento, embora catódico, não permita uma elevada velocidade da reação catódica, de modo a que esta ocorra com reduzida intensidade, pelo que, mesmo ocorrendo a formação de um par galvânico em um eventual poro, não seja de se esperar uma reação anódica intensa com corrosão intensa do substrato (PICAS; PUNSET; RUPÉREZ; MENARGUES *et al.*, 2019). Neste sentido, a utilização de um revestimento com muito baixa porosidade (face aos valores típicos obtidos por aspersão térmica) e como uma espessura considerável, levando a que a maioria dos poros não apresente continuidade, é também uma vantagem. A presença de microfissuras na camada de óxido também pode impedir a proteção total ao substrato, pelo que, em ambientes altamente agressivos envolvendo desgaste e corrosão, também se justifique o uso de uma camada espessa de revestimento que (se fabricada corretamente) pode ser totalmente protetora e livre de microfissuras (PICAS; PUNSET; RUPÉREZ; MENARGUES *et al.*, 2019).

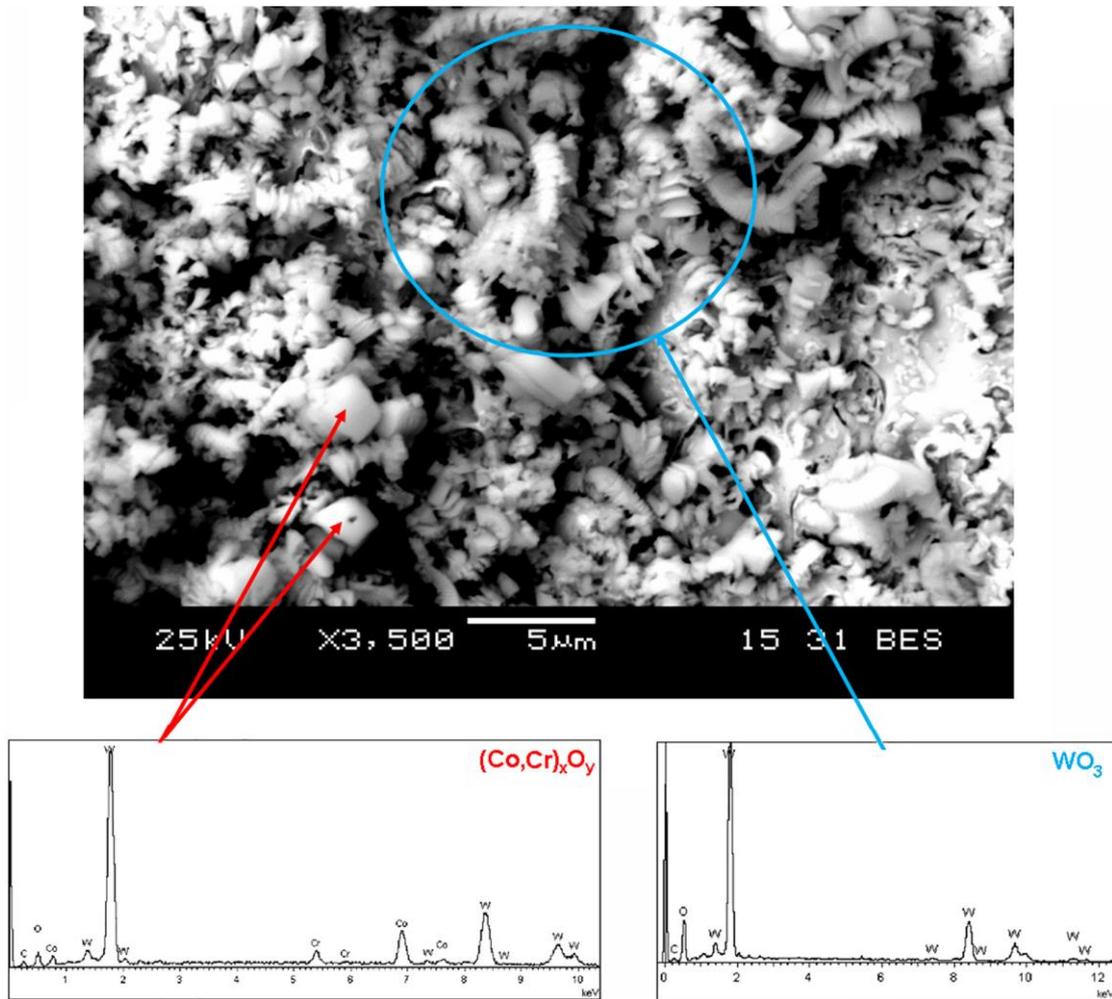


Figura 40 – Micrografia mostrando a morfologia de alguns óxidos formados na superfície do revestimento WC-CoCr HVOF, após realização de testes de polarização cíclica e as correspondentes microanálises EDS. (PICAS; PUNSET; RUPÉREZ; MENARGUES *et al.*, 2019)

A aplicação de revestimentos capazes de formar uma superfície dura sobre o material base é uma das técnicas desenvolvidas para se reduzir os efeitos prejudiciais e estender a vida útil dos componentes expostos a ambientes erosivos (SUGIYAMA; NAKAHAMA; HATTORI; NAKANO, 2005). Realizar testes é a melhor alternativa para avaliar como um material com ou sem revestimento protetor reage a um determinado ambiente. Os testes são rápidos e o custo é muito menor do que realizar experiências de tentativa e erro direto no equipamento proposto para funcionamento da peça a ser aplicada um revestimento protetor contra desgaste erosivo-corrosivo. Assim, testes erosivos-corrosivos foram realizados à exaustão nessa pesquisa a fim de caracterizar o desempenho de materiais frente a seus mecanismos de desgaste. As metodologias dos testes são apresentadas no capítulo 5 e em forma de fluxograma na Figura 45.

Capítulo 4

Projeto e Construção de Equipamentos para Ensaios de Desgaste Erosivo com Uso Simultâneo de Partículas Sólidas e de Líquido no Jato de Ar Erodente

4 PROJETO E CONSTRUÇÃO DE EQUIPAMENTOS PARA ENSAIOS DE DESGASTE EROSIVO COM USO SIMULTÂNEO DE PARTÍCULAS SÓLIDAS E DE LÍQUIDO NO JATO DE AR ERODENTE

4.1 OBJETIVO

Nesta fase, o objetivo é analisar, em escala de laboratório, que fenômenos ocorrem quando as solicitações de erosão-corrosão atuam em pás de turbinas OWC. Para isso é necessário o uso de um equipamento capaz de emitir um jato *spray* a alta velocidade (com particulados sólidos e solução salina), uma vez que é essa combinação que confere as reais condições para testagem, observando o tempo adequado de exposição, de forma que não se submeta o corpo-de-prova a longo ensaio, nem se tenha condições tão agressivas que destruam os corpos-de-prova, principalmente em se tratando de revestimentos.

4.2 LIMITAÇÕES

No Laboratório de Materiais Cerâmicos da UFRGS (LACER) e no Laboratório de Ensaio e Desgaste & Materiais (LED&MAT) do Instituto Pedro Nunes (IPN), da Universidade de Coimbra, há equipamentos com algumas características semelhantes, mas que, no entanto, trabalham somente a seco, não possibilitando o erodente líquido. Os ensaios de resistência à erosão, em Coimbra, por exemplo, são efetuados utilizando um equipamento Air Jet Erosion Test, construído pela Falex Corporation, normalizados pela ASTM G76.

Apesar da extensa busca, não foram localizados equipamentos com todas as funcionalidades necessárias para os testes de erosão planejados, especialmente que permitissem trabalhar com fluxo de ar e com partículas sólidas e líquidas simultaneamente, razão pela qual foi necessária a construção de equipamentos exclusivos para esta pesquisa.

Além disso, cabe ressaltar que também não há uma norma internacional que defina condicionantes para testes erosivos com uso simultâneo de partículas sólidas e líquidas. A norma ASTM G134 aborda testes de erosão em meio líquido, porém como o fluido de transporte nesta pesquisa é exclusivamente o fluxo de ar, optou-se então por utilizar como referência a norma ASTM G76-95, mas adaptando-a ao desenvolvimento de metodologias próprias e à construção dos equipamentos necessários para os testes de desgaste erosivo. Sendo assim, nesse estudo de desgaste erosivo foram aplicadas metodologias não

normalizadas, justamente por não existirem. A preocupação na aplicação do método de ensaio foi focada em ajustes de controle e repetibilidade.

4.3 ANÁLISE DA NORMA ASTM G76-95

Os ensaios de resistência à erosão normalizados pela ASTM G76 são efetuados utilizando um equipamento de jato de ar com incremento de partículas sólidas erodentes. O ensaio consiste em projetar sobre a superfície da amostra, durante um dado período de tempo, um erodente com uma determinada velocidade e dispersão. O coeficiente de erosão é expresso pela perda de massa da amostra em relação à massa total do erodente utilizado.

De acordo com a seção 4 da norma ASTM G76, um conjunto padrão de condições de teste é estabelecido, porém desvios de algumas dessas condições são permitidos, desde que descritos completamente. Isso permite o ajuste de uma série de condições de acordo com a necessidade dos ensaios de erosão. Assim, admite-se que métodos alternativos sejam descritos para preparação do ensaio e das amostras, conduzindo a exposição à erosão e relatando os resultados (G76-13, 2013).

No entanto, considerando a particularidade de que para se aproximar às condições tribológicas em que as pás da turbina da COP estão expostas, é preciso que no fluido de trabalho dos ensaios erosivos, além de se utilizar o ar comprimido, sejam adicionadas a solução salina e a areia calibrada. Logo, nesse caso, a norma ASTM G76 é utilizada como referência para os testes, porém com as devidas adaptações, de forma a permitir que o equipamento atenda aos requisitos específicos de representação do fluxo e das condições de trabalho. Considerando essas premissas, a Figura 41 apresenta o esquema de funcionamento do equipamento pretendido para os testes erosivos.

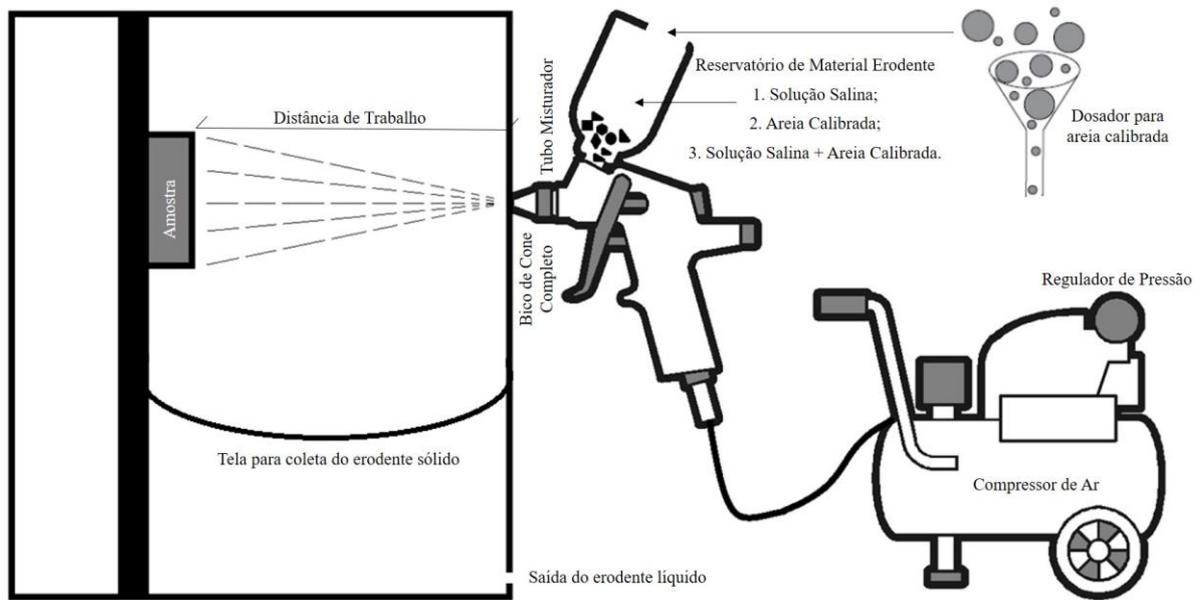


Figura 41 – Desenho esquemático de equipamento de erosão de partículas sólidas. Adaptado de (G76-13, 2013)

A seção 6 da norma ASTM G76 define que o equipamento deve ser capaz de desgastar o material de um corpo-de-prova sob condições de exposição bem controladas. As características necessárias do aparelho incluem meios de controlar e de ajustar a velocidade de impacto das partículas, o fluxo de partículas e a localização do corpo-de-prova e sua orientação para receber o fluxo de impacto. Há também definições quanto ao comprimento do tubo e ao diâmetro do bocal de abertura pelo qual percorre o jato de ar. O material a ser utilizado na fabricação deve ser resistente à erosão do erodente, devendo ser descartado se a abertura do bocal exceder um aumento de 10% de seu diâmetro nominal. A introdução de partículas para o fluxo de ar comprimido podem incluir um funil controlado por vibrador ou um sistema de alimentação por parafusos, sendo necessário que o sistema forneça uma alimentação de partículas uniformes e que seja ajustável para acomodar valores de fluxo de partículas desejados. Um método para medir a velocidade das partículas deve ser disponível para uso em conjunto com o equipamento de erosão, o que fica inviabilizado quando se trata de uma mistura de partículas sólidas e líquidas (G76-13, 2013).

Os resultados a serem obtidos nos ensaios de erosão nessa pesquisa são comparativos entre si, não havendo qualquer referência externa, justamente por se tratar de condições de teste peculiares ao objeto de estudo (pás da turbina da COP). O uso de equipamento para ensaio erosivo utilizando solução salina em conjunto com particulado sólido em meio ao fluxo

de ar comprimido é necessário para garantir que as condições de ensaios sejam semelhantes às encontradas na operação da COP. As condições experimentais são governadas, principalmente, pelas dimensões do equipamento e seus elementos de fixação, bem como pela pressão de trabalho (válvula reguladora de pressão), assegurando assim a validade das comparações entre material não revestido e com revestimento protetor.

4.4 APRESENTAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS CONSTRUÍDOS

De início, optou-se pelo uso de uma pistola de pintura para jateamento dos erodentes, pois em um tubo *venturi* com passagem de ar comprimido a elevada pressão sobre um recipiente com solução salina e partículas de areia em agitação, a passagem do ar comprimido a elevada velocidade traz por arraste a solução salina juntamente com os particulados, como ocorre na COP, e cujo princípio é semelhante ao funcionamento de pistolas de pintura.

No total, foram construídos dois equipamentos para ensaios erosivos. O primeiro equipamento, Equipamento Ensaio Erosivo versão 1 (EEEv1), construído em 2017 nas dependências do Laboratório de Elétroquímica do IST, foi responsável pela realização de diferentes tipos de desgaste erosivo sobre as superfícies dos corpos-de-prova, posteriormente analisados em ensaios de corrosão por EIE. Já o segundo equipamento (EEEv2) foi construído nas dependências do Laboratório de Materiais Cerâmicos da UFRGS, em 2018, com o objetivo de ampliar a variabilidade dos parâmetros de ensaio de desgaste erosivo. A Figura 42 apresenta detalhes do primeiro equipamento construído para realização dos testes de erosão.

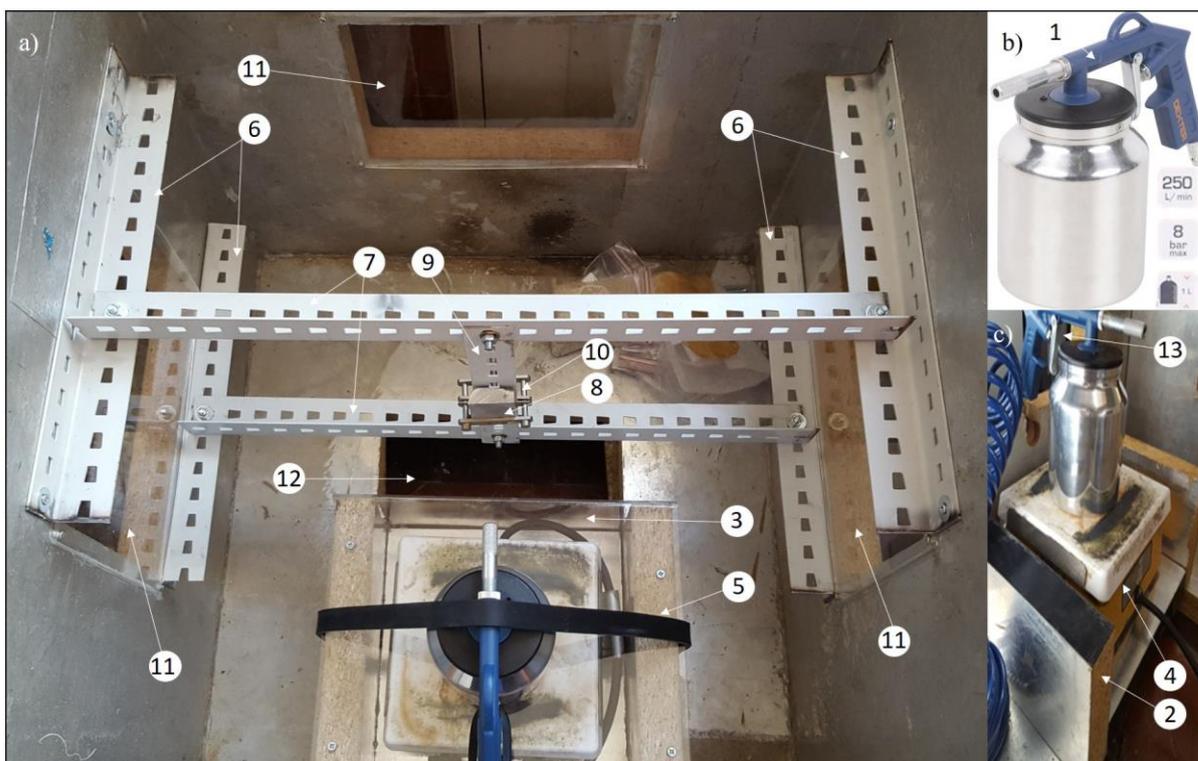


Figura 42 – Equipamento para desgaste erosivo EEEv1, construído em 2017 (IST, Lisboa): vista superior (a) - base em acrílico transparente (3), tira elástica (5), cantoneiras perfuradas (6 e 7), corpo-de-prova (8), barra central (9), grampo fixador (10), chapas de acrílico transparentes (11) e abertura para coleta dos erodentes (12); pistola de arear (b) - (1) e base do conjunto agitador magnético (c) - base em MDF (2), agitador magnético (4) e conexão da mangueira pneumática (13).

No equipamento da Figura 42 utilizou-se uma pistola de arear da marca Dexter, com reservatório em alumínio e capacidade limitada a 1 L (Figura 42-1). Uma base em MDF (Figura 42-2) com fechamento em acrílico transparente (Figura 42-3) foi construída no interior da caixa para garantir o isolamento elétrico e o funcionamento de um agitador magnético (Figura 42-4). O fechamento em acrílico serviu como base de apoio e de fixação da pistola no interior da caixa através de uma tira elástica (Figura 42-5). O sistema de fixação do corpo-de-prova foi construído com cantoneiras perfuradas (Figura 42-6 e 42-7), permitindo que o corpo-de-prova (Figura 42-8), preso no centro da barra central (Figura 42-9), com auxílio de um grampo fixador (Figura 42-10), fosse aproximado ou afastado do bico da pistola de ar comprimido de acordo com a necessidade. Uma vez escolhida a posição de realização do ensaio, esta era fixada com auxílio de parafusos. Foi utilizado um agitador magnético para garantir a mistura da areia calibrada com a solução salina, quando esses erodentes foram utilizados em conjunto.

A caixa antes mencionada foi construída em tábuas quadradas de madeira MDF com medidas de 800 mm x 800 mm e com cortes retangulares no centro, os quais foram utilizados como janelas com chapas de acrílico transparentes (Figura 42-11) para melhor visualização durante a execução dos ensaios. Seis blocos quadrados foram montados com o auxílio de um perfil L, em aço carbono SAE 1020 e parafusos de fixação, sendo que a parte superior não foi fixada para que pudesse servir de tampa e a parte inferior permaneceu aberta com a finalidade de coleta da solução salina com areia calibrada durante os ensaios (Figura 42-12). Em uma das laterais havia abertura para conexão da mangueira pneumática com a pistola de ar ao compressor de ar (Figura 42-13).

No ano seguinte, em 2018, foi construído o equipamento final EEEv2 (Figura 43) que possibilitou o aumento da duração de cada teste até então limitado ao reservatório de capacidade de 1 L.

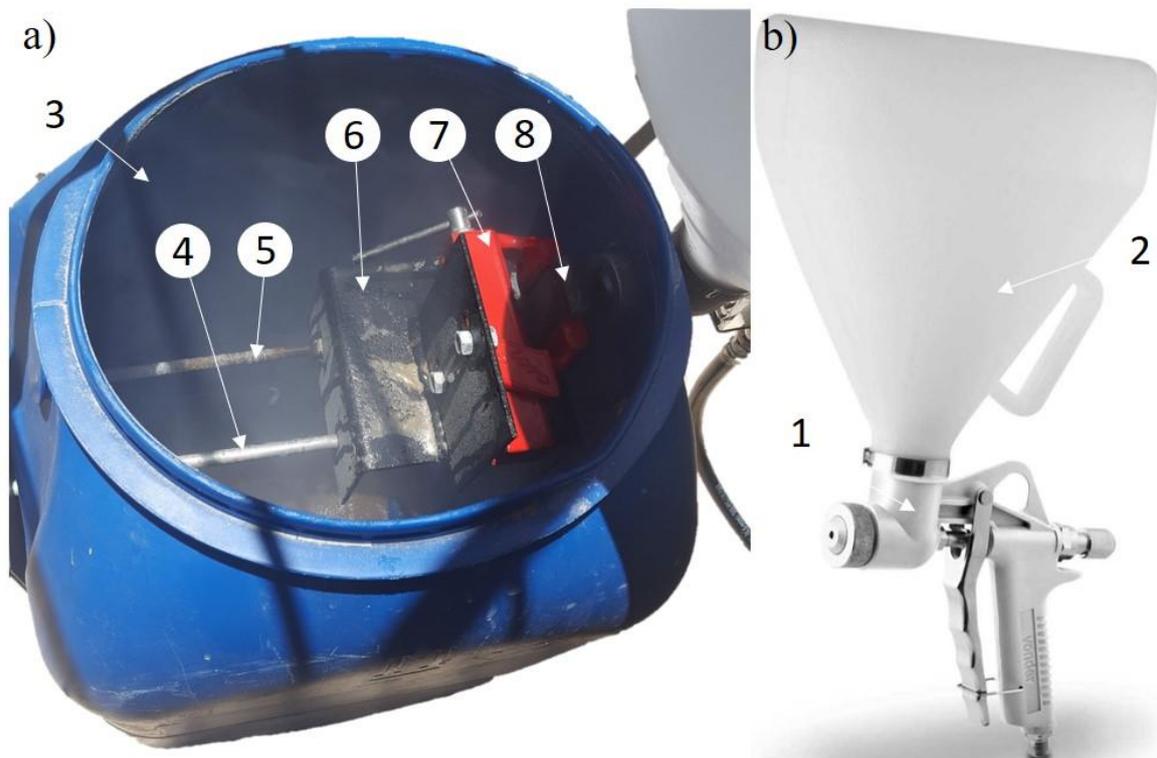


Figura 43 – Equipamento para desgaste erosivo EEEv2, construído em 2018 (UFRGS, Porto Alegre): vista superior (a) - reservatório de plástico (3), fuso (4), barra roscada (5), base móvel (6), mini morsa (7) e corpo-de-prova (8) e pistola de ar comprimido (b) - (1) e funil de admissão dos erodentes (2).

Foi utilizada uma pistola de ar comprimido, da marca Vonder/modelo PTV83, com bico em aço carbono e abertura de 4,5 mm de diâmetro (Figura 43-1). Um funil com capacidade de 5 L, que permite a admissão dos erodentes no tubo da pistola por gravidade, pois fica na parte superior e é aberto (Figura 43-2), o que possibilitou a adição dos erodentes manualmente de acordo com o tipo de ensaio desejado. Utilizou-se um reservatório de plástico de 30 L (Figura 43-3), uma pistola de ar comprimido com reservatório aberto e uma estrutura de fixação do corpo-de-prova em fuso com barra roscada (Figura 43-4 e 43-5), responsável pela movimentação da base móvel (Figura 43-6) para as proximidades do bico da pistola de ar comprimido. Sobre essa base móvel foi fixada uma mini morsa (Figura 43-7) para prender o corpo-de-prova (Figura 43-8).

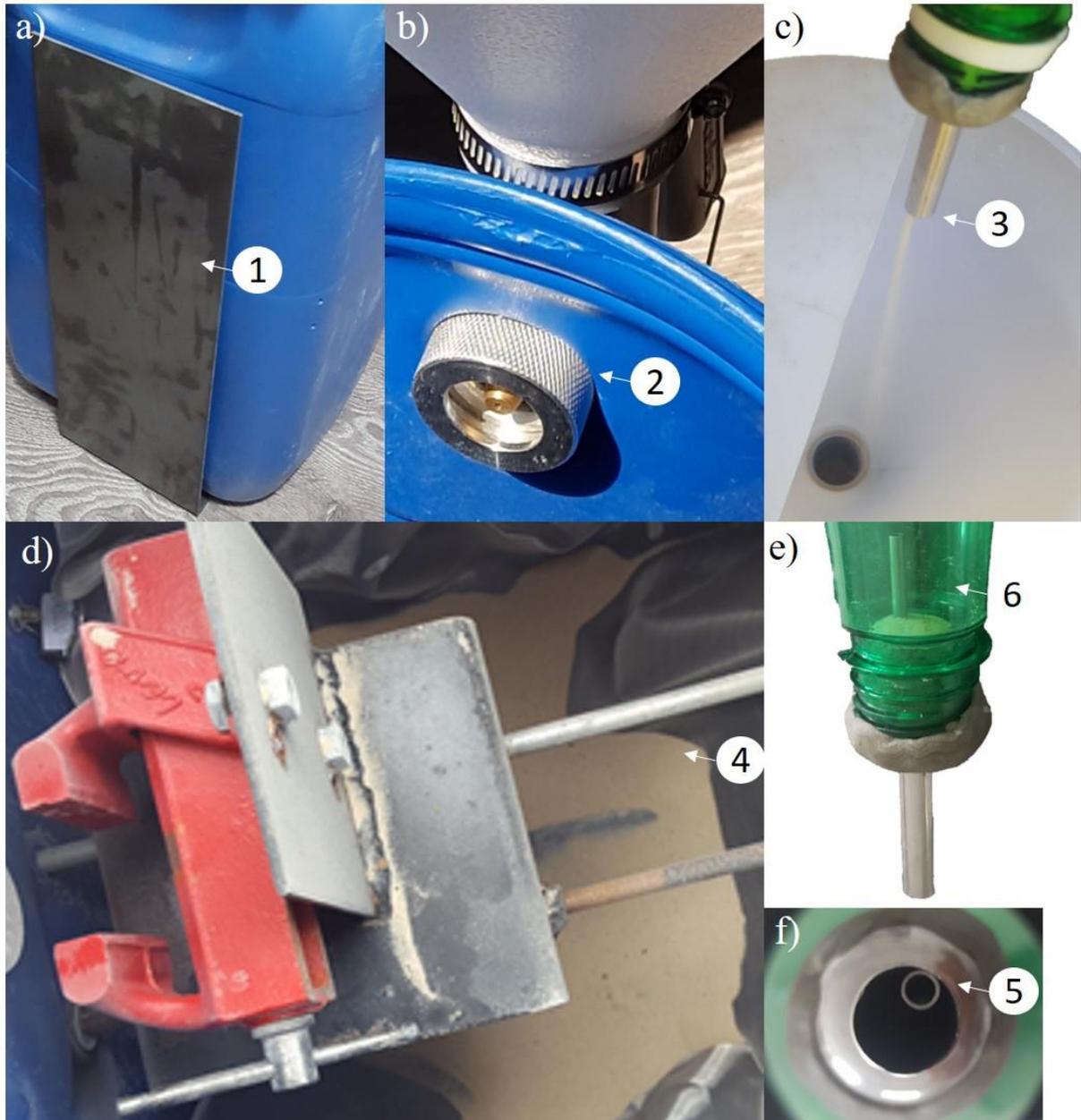


Figura 44 – Detalhes construtivos do equipamento EEEv2: perfil U em aço 1020 envolvendo o reservatório plástico (a) - (1), adesão do conjunto pistola/ reservatório plástico (b) - (2), referência para adição de erodentes (c) - (3), malha de aço para coleta de areia calibrada pós ensaio (d) - (4), tubo dosador do reservatório secundário (e) - (6) e bocal do dosador (f) - (5).

A Figura 44 apresenta detalhes construtivos desse último equipamento construído. O perfil U serviu de estrutura para montagem do conjunto fuso e barra roscada, que contava com manípulo para movimentação da estrutura com o corpo-de-prova (Figura 44-1). A pistola de ar comprimido tinha uma abertura frontal para troca de bicos com diferentes diâmetros (não utilizado), tendo sido possível prendê-la utilizando um anel *o-ring* e um furo um pouco maior que o diâmetro da rosca da pistola para troca de bicos, fazendo com que a fixação ocorresse

por pressão entre a pistola/reservatório e bico da pistola (Figura 44-2). Um reservatório secundário com bico dosador foi utilizado para adição dos erodentes. A altura da ponta do dosador em relação ao funil da pistola foi mantida constante durante a realização dos ensaios erosivos, pois o lado do funil parcialmente fechado funcionou como referência (Figura 44-3). Uma tela metálica de aço inox de malha 150 e fio 0,06 mm, fornecida pela empresa Tegape, foi fixada dentro do equipamento por meio de um sistema de grampo e parafusos, facilitando a remoção a cada ensaio realizado (Figura 44-4). O dosador contava com dois canais de passagem, um de $\varnothing 8,5$ mm e outro de $\varnothing 2,5$ mm, sendo que o canal mais estreito foi o utilizado (Figura 44-5). Dessa forma, a areia calibrada, mais fina, passava pelo canal estreito e, durante o seu percurso constante de 80 mm (Figura 44-6), a vazão era regulada.

4.5 CONDIÇÕES PADRÃO DE TRABALHO

A seção 9 da norma ASTM G76 define as condições padrão de trabalho para os testes de erosão de forma detalhada, especificando o tamanho do tubo e do bocal de saída do jato. O tamanho e a calibragem das partículas dos erodentes também são definidos, bem como a importância de não se reutilizar os erodentes após a realização dos testes, pois o mesmo deve ser coletado para medição de massa e granulometria pós impacto. O ar comprimido deve ser nominalmente seco. A velocidade da partícula abrasiva, a velocidade o fluxo de ar comprimido, a pressão de trabalho, o tempo de realização dos testes, o ângulo entre o eixo do bocal ao corpo-de-prova, a distância entre o bocal e o corpo-de-prova, a temperatura de teste e a taxa de alimentação de partículas erodentes, são exemplos de condições padrão de trabalho recomendadas na referida seção (G76-13, 2013).

Ao relacionar tais condições padrão de trabalho com os objetivos dos testes realizados nessa pesquisa, alguns deles podem ser comparados, já outros não se aplicam por não ser essencial para a interpretação dos resultados. O mais importante e relevante dos condicionantes de trabalho dos testes realizados é a identificação dos meios de controle e sua replicabilidade, ensaio após ensaio. A Tabela 10 apresenta um resumo de condições de trabalho recomendadas pela norma ASTM G76 e as que foram aplicadas no equipamento construído.

Tabela 10 – Relação de condições de trabalho da norma ASTM G76 e do equipamento utilizado.

| Condições de Trabalho | ASTM G76 | EEEv2 |
|---------------------------------------------------------------|----------------------------------------|------------------------|
| diâmetro interno da abertura do bocal | 1,5 mm ± 0,075 mm | 4,5 mm |
| comprimento do tubo do bocal | 50 mm | não especificada |
| tamanho da partículas erodentes | 50 µm | 50 µm a 1000 µm |
| velocidade da partícula erodente | 30 ± 2 m·s ⁻¹ | não aplicável |
| velocidade o fluxo de ar | 0,13 L/s | não aplicável |
| pressão do ar comprimido | 1,4 bar | variada de 3 a 7 bar |
| tempo de teste | 600 s | variada de 120 a 720 s |
| ângulo entre o eixo do bocal e a superfície do corpo-de-prova | 90 ± 2° | 45° e 90° |
| temperatura do teste | entre 18 °C a 28 °C | não controlada |
| taxa de alimentação de partículas erodentes | 0,033 ± 0,008 g/s | dosador/gravidade |
| fluxo de partículas na superfície do corpo-de-prova | 2 mg·mm ⁻² ·s ⁻¹ | não aplicável |
| distância da superfície do corpo-de-prova até o fim do bocal | 10 ± 1 mm | variada de 10 a 35 mm |

*O primeiro equipamento construído em 2017 nas dependências do IST (EEEv1), não trabalhou com partículas erodentes sólidas e ar comprimido, mas sim em conjunto com solução salina. Portanto não cabe relacioná-lo nesta Tabela 10.

4.6 PROCEDIMENTO DE REALIZAÇÃO DE TESTE EROSIVO

A seção 11 da norma ASTM G76 define o procedimento de realização do teste de erosão. Inicialmente recomenda-se medir a velocidade das partículas erodentes e a velocidade do fluxo de ar, bem como a coleta dos erodentes pós impacto a fim do ajuste e da definição das condições desejadas. Na sequência é enfatizada a importância da preparação da superfície dos corpos-de-prova para o alcance de uniformidade e acabamento adequado. O corpo-de-prova então pode ser fixado no equipamento com a orientação e a distância do bocal do jato desejadas. Submete-se o corpo-de-prova ao impacto de partículas para um intervalo de tempo, removendo-o cuidadosamente e calcula-se a perda de massa envolvida no processo. O processo é repetido para intervalos de tempo diferentes objetivando determinar o comportamento de perda de massa versus tempo decorrido. A taxa de erosão é determinada a partir da inclinação da curva no gráfico de perda de massa versus tempo de ensaio. O valor médio da erosão (mm³·g⁻¹) é calculado dividindo a taxa de erosão (mg/s) pela taxa de fluxo abrasivo (g/s) e, em seguida, dividindo pela densidade da amostra (g·cm⁻³). A norma ainda recomenda repetir a série de testes a fim de validação dos resultados obtidos (G76-13, 2013).

Os procedimentos aqui relatados descrevem um roteiro recomendado para validação dos resultados de desgaste erosivo. No entanto, para ensaios sobre equipamentos adaptados da norma e com funcionalidade de reproduzir efeitos tribológicos de um determinado objeto de

estudo, tais procedimentos também podem ser adaptados. A descrição dos procedimentos utilizados nessa pesquisa são apresentados no capítulo 5.

Capítulo 5

Metodología

5 METODOLOGIA

5.1 FLUXOGRAMA DA PARTE EXPERIMENTAL DA TESE

A parte experimental desta pesquisa teve etapas realizadas *in loco* na COP, no IST em Portugal e na UFRGS no Brasil, sendo que algumas dessas etapas, inclusive, ocorreram de forma simultânea, bem como outras só puderam ser realizadas após a conclusão de etapas preliminares. A metodologia aplicada nos ensaios experimentais da tese foi dividida em cinco fases.

Na fase 1 foi analisado o desgaste da turbina da COP, o seu sistema tribológico e a identificação do material utilizado na fabricação das pás. Na fase 2 obteve-se corpos-de-prova para realização de testes de desgaste erosivo e corrosivo. Na fase 3 foi construído um equipamento para causar desgaste superficial nos corpos-de-prova, de forma com que pudessem passar por testes de corrosão realizados durante a fase 4. Por fim, na fase 5 foi construído outro equipamento para a realização de testes erosivos com a finalidade de mapear os efeitos superficiais ocasionados nos corpos-de-prova em função das variações de condições de ensaio e do tipo de erodente utilizado.

Para ilustrar as interações entre as etapas realizadas, apresenta-se um fluxograma, que é uma das formas mais utilizadas para demonstrar uma gama de processos realizados e que possibilita um maior entendimento geral do objeto de estudo e das ferramentas utilizadas para o alcance dos resultados obtidos. A Figura 45 apresenta as etapas desenvolvidas nos procedimentos experimentais do presente trabalho, bem como as técnicas utilizadas em cada etapa.

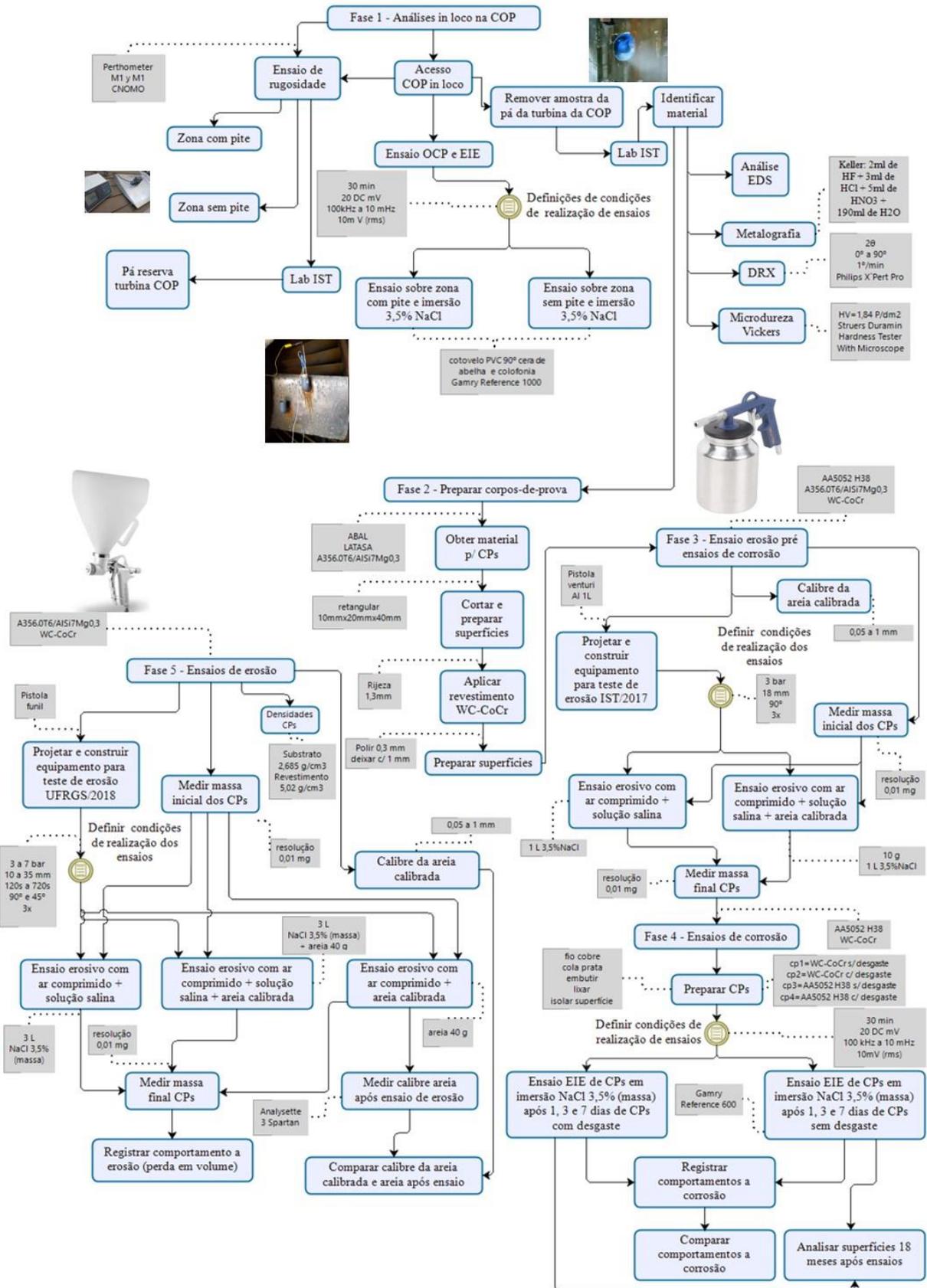


Figura 45 – Fluxograma da parte experimental da Tese.

5.2 FASE 1 – APLICAÇÕES DEPENDENTES DE ANÁLISES *IN LOCO* NA COP

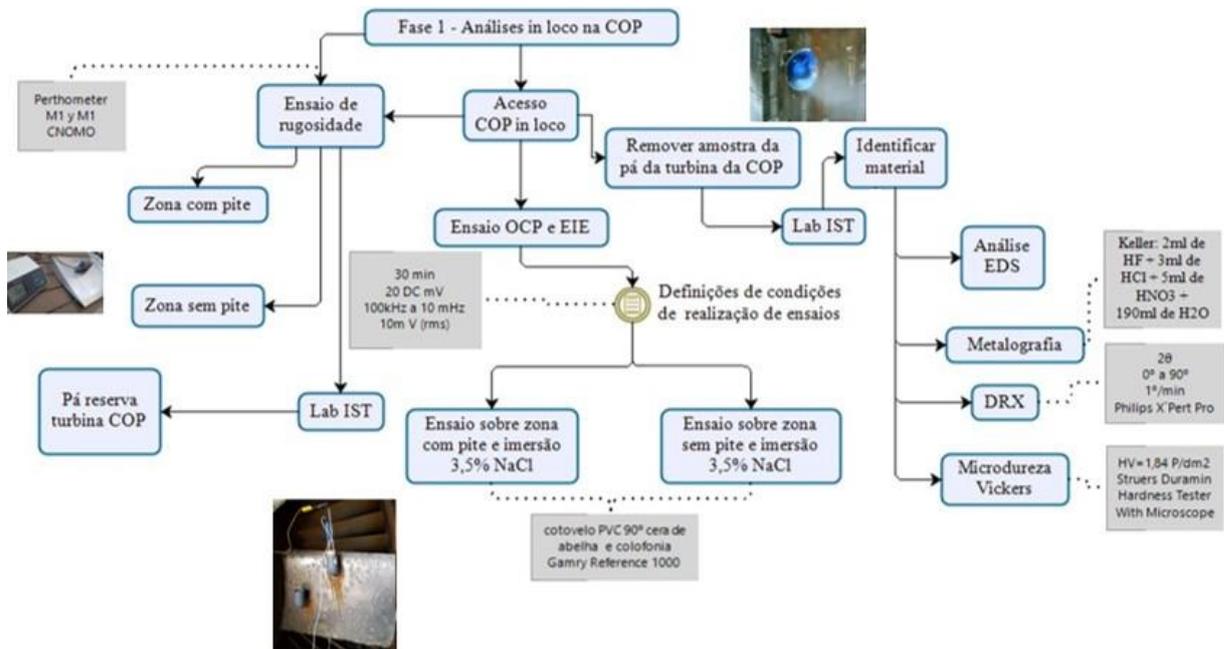


Figura 46 – Detalhamento do fluxograma da parte experimental da Tese (Fase 1).

A primeira etapa dos ensaios foi realizada em Portugal para a identificação do grau de degradação das pás da turbina da COP e para a confirmação do material utilizado em sua fabricação e demais informações relevantes que poderiam ser obtidas somente *in loco*. Pode-se dizer que essa primeira etapa foi um ponto crítico desse trabalho, de suma importância para o desenvolvimento desta pesquisa. Em 2017, a COP estava em pleno funcionamento e para que fosse possível realizar os ensaios desejados, era necessário o interrompimento total de sua operação. Dessa forma, foi preciso aguardar o período do verão, onde as águas marítimas são mais calmas, não oferecendo condições para a produção de energia elétrica. Ao final do verão de 2017, mais precisamente no mês de outubro, foi possível ir até a ilha do Pico nos Açores para uma visita técnica e realização dos trabalhos investigativos.

Nessa inspeção, foi removida uma pequena amostra de uma das pás da turbina (ponteira da borda inferior da pá, com lados de aproximadamente 5 cm e espessura máxima de 1 cm), pois diante da impossibilidade de obtenção de registros históricos comprovativos de qual liga de alumínio foi utilizada na sua fabricação, somente uma caracterização dessa amostra poderia indicar qual liga de alumínio marítimo foi utilizada. Na oportunidade, também foram concluídos ensaios de rugosidade, de corrosão, bem como realizou-se uma inspeção visual de toda estrutura/equipamentos que fazem parte da COP.

A Figura 47 apresenta a amostra removida de uma das pás da turbina da COP e a pá da turbina após a remoção.

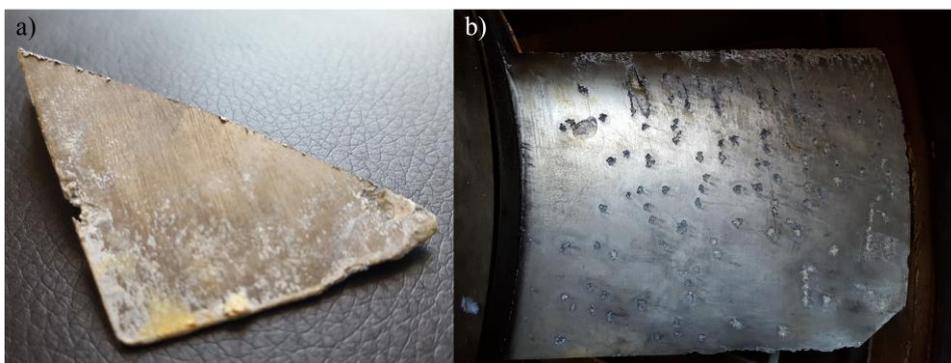


Figura 47 – Turbina da COP em outubro de 2017: material removido de uma das pás (a) e pá da turbina após a remoção do material (b).

A pequena amostra de material removida de uma das pás da COP foi fatiada e submetida a análises laboratoriais por meio das técnicas de:

a) EDS - microanálise de energia dispersiva: no IST, utilizou-se um MEV - microscópio eletrônico de varredura, Hitachi S2400, com detector EDS da Bruker acoplado para análise da composição química, semiquantitativa, possibilitando o estudo da microestrutura e a obtenção de imagens com alta resolução da amostra da pá da turbina da COP;

b) Metalografia: a amostra é embutida em material termoplástico (baquelite) por meio de prensa na máquina Arotec Pré-30, pressão e aquecimento para efetuar a polimerização; lixamento para eliminar riscos e marcas mais profundas da superfície; polimento com pasta de diamante que visa um acabamento superficial isento de marcas; ataque químico para visualização dos contornos de grão e as diferentes fases na microestrutura, onde um contrastante ácido (Keller: 2ml de HF + 3ml de HCl + 5ml de HNO₃ + 190ml de H₂O) é colocado em contato com a superfície da peça por certo tempo realçando os contornos de grão e dá diferentes tonalidades às fases permitindo sua identificação das mesmas no microscópio;

c) DRX - difratometria de raio X: o equipamento utilizado foi o da Philips X'Pert Pro, com varredura de 0° a 90°, com escala de 2θ e velocidade de 1°/min;

d) Microdureza Vickers: baseia-se na resistência que o material oferece à penetração de uma pirâmide de diamante de base quadrada e ângulo entre faces de 136°, sob uma determinada carga. Foram feitas 3 indentações, sem espaçamento pré-

definido, no equipamento Struers Duramin Hardness Tester With Microscope. A carga aplicada foi de 300g por 15 segundos. Após remoção da carga, com o próprio equipamento, medem-se as duas diagonais da base da indentação (d_1 e d_2). O valor médio das diagonais de indentação (d_m em mm) junto com a carga aplicada (P em kg) são utilizados na fórmula de cálculo, $HV=1,854 P / d_m^2$ para se obter a microdureza Vickers (HV).

A rugosidade da superfície é, naturalmente, uma propriedade mensurável da qualidade do polimento e é traduzida quantitativamente por dois parâmetros de rugosidade média, Ra e Rz . A medição da rugosidade é feita através de um rugosímetro, constituído por três componentes: apalpador (*pick-up*), consistindo em uma agulha que acompanha as ondulações da superfície, transformando o seu movimento em sinais elétricos que são emitidos para o amplificador; acionador, responsável pela deslocação da agulha, a uma velocidade constante e segundo a mesma direção; amplificador, que é o receptor eletrônico que converte os sinais provenientes da agulha, para valores de uma função escolhida (Ra e Rz , por exemplo) (AMARAL; ROSA; PINTO; POZO, 2004).

A rugosidade média (Ra) corresponde à média aritmética do afastamento dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média dentro do percurso de medição. Utilizou-se dessa técnica para fazer uma análise comparativa da Ra entre a superfície de uma pá de reserva (nunca utilizada e que se encontra no IST), uma zona da páda turbina da COP fortemente atacada por pite e uma zona mais limpa dessa pá para evidenciar um desgaste que não pode ser visto de forma macroscópica. Foi utilizado o equipamento portátil Perthometer M1 com unidade de avanço PFM da empresa Mahr GmbH, seguindo as normas para medição. A Figura 48 ilustra o equipamento utilizado junto a uma pá reserva da COP (ver anexo V).



Figura 48 – Pá da turbina reserva da COP com rugosidade média de 0,626 μ m.

O estudo da corrosão na turbina envolveu o uso de EIE, pois esta é a técnica mais adequada a ser utilizada para obter informações sobre os mecanismos de corrosão. De fato, mesmo uma análise simples da forma dos diagramas de impedância, em particular os diagramas de Bode, pode permitir a detecção da corrosão de pite, porque os processos correspondentes dão uma impressão digital completamente típica nestes diagramas. Assim, o objetivo deste teste é determinar se as crateras observadas no material desgastado foram formadas devido a uma corrosão de pite ou se elas são um resultado de processos de desgaste puramente mecânicos.

Como a turbina ainda estava em uso, as medições foram realizadas no local e a configuração experimental foi desenvolvida especificamente para a geometria particular das pás (posição vertical). Como a técnica requer o uso de um potenciostato e um arranjo de 3 eletrodos, a instalação contou com um recipiente onde uma solução (água do mar) pudesse estar em contato com a superfície da pá (eletrodo de trabalho) e com outros 2 eletrodos. Para isso, uma área circular exposta da pá foi definida com um diâmetro de 25 mm, mascarando-se com uma mistura de cera de abelha e colofonia. Em seguida, um cotovelo de tubulação em PVC 90° com diâmetro de uma polegada e meia foi colado à área mascarada usando a mesma mistura de cera de abelha e colofonia (Figura 49). O tubo foi então enchido com água do mar (obtida no local) e um eletrodo de calomelanos saturado e uma espiral de platina foram inseridos (através de uma tampa de borracha), atuando como eletrodos de referência e

auxiliar, respectivamente. Foi utilizado o potenciostato Gamry Reference 1000, controlado por um laptop usando o *software* Gamry Framework.



Figura 49 – Turbina da COP em outubro de 2017: fixação dos componentes para ensaio EIE no lado terra (a) e ensaio de EIE sendo realizado (b).

Após a introdução da solução eletrolítica (água do mar), o potencial de circuito aberto (OCP) da lâmina de alumínio foi monitorado durante 30 min, permitindo sua estabilização. Em seguida, as medidas de impedância eletroquímica foram realizadas em um potencial dc 20 mV menor que o OCP, a fim de evitar problemas de linearidade devido às características autocatalíticas do processo de pite (MANSFELD; FERNANDES, 1993). Foi utilizada uma perturbação sinusoidal de potencial com amplitude de 10 mV (rms), com frequências variando de 100 kHz a 10 mHz, adquirindo 9 pontos por década.

Dois locais diferentes foram selecionados na pá, como mostrado na Figura 49, um correspondente a uma área fortemente atacada por pite e o outro a uma área mais limpa, embora mesmo neste caso não seja possível descartar a existência de pites pequenos.

5.3 FASE 2 – PREPARAÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA

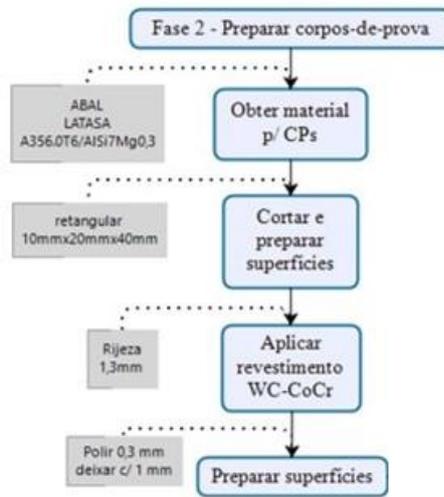


Figura 50 – Detalhamento do fluxograma da parte experimental da Tese (Fase 2).

Com base nas informações recebidas da empresa Voith Hydro sobre o provável material da turbina da COP, a empresa Latasa, que atua com reciclagem de alumínio, fabricou e doou para esta pesquisa 15 kg do alumínio A356.0 T6/AlSi₇Mg_{0,3}, em dois lingotes de 1 m cada. Essa liga foi recebida em julho/2017. A Figura 51 apresenta um dos lingotes.



Figura 51 – Alumínio A356.0 T6/AlSi₇Mg_{0,3} fornecido pela empresa Latasa do Grupo Recicla BR.

O material foi cortado em retangulos de 10 mm de espessura por 20 mm de largura e 40 mm de comprimento, formando 24 corpos-de-prova retangulares, sendo que apenas em uma das faces foi aplicado revestimento WC-CoCr por aspersão térmica HVOF. A escolha do WC-CoCr para esta pesquisa foi em razão de suas propriedades de microdureza de 1350 HV, cerca de 15 vezes maior que o alumínio AA5052 H38, e de sua resistência ao ensaio de névoa salina de mais de 4000 horas, principalmente devido à adição de cromo.

A empresa Rijeza Metalúrgica, localizada na cidade de São Leopoldo, estado do Rio Grande do Sul/BR e parceira da UFRGS em processos investigativos, foi responsável por aplicar a técnica de aspersão térmica HVOF e o polimento nos corpos-de-prova de alumínio da liga A356.0 T6/AlSi₇Mg_{0,3}. O equipamento TAF A modelo JP-5000HP/HVOF foi utilizado no processo de deposição do revestimento protetor WC-CoCr com espessura do revestimento em 1,3 mm. Os arquivos referentes aos parâmetros utilizados no processo de aspersão térmica HVOF e as características da matéria-prima em pó WC-CoCr utilizada encontram-se nos anexos II e III.

Após o processo de deposição do revestimento protetor, as superfícies aspergidas foram polidas pela empresa Rijeza para se obter uma superfície lisa e uniforme, reduzindo a espessura do revestimento protetor para 0,5 mm (ver Figura 39) e garantindo uma superfície homogênea. Os corpos-de-prova contendo em uma das faces puramente revestimento WC-CoCr e na outra face puramente o substrato em alumínio A356.0 T6/AlSi₇Mg_{0,3} (Figura 52) foram utilizados em testes de desempenho erosivo/corrosivo.

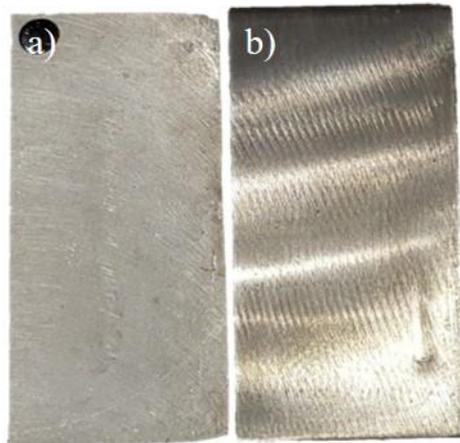


Figura 52 – Corpos-de-prova utilizados nos ensaios de erosão e nos ensaios de corrosão: lado substrato A356.0 T6/AlSi₇Mg_{0,3} (a) e lado com revestimento protetor WC-CoCr (b).

A análise elementar por EDS dos corpos-de-prova no lado do revestimento revelou a composição química obtida. A Figura 53 apresenta a micrografia e composição química do primeiro revestimento protetor WC-CoCr obtido e que foi aplicado pela Rijeza em somente uma peça irregular de 60 mm (correspondente a uma das extremidades do lingote apresentado na Figura 51) para envio ao IST, durante a primeira etapa desse estudo.

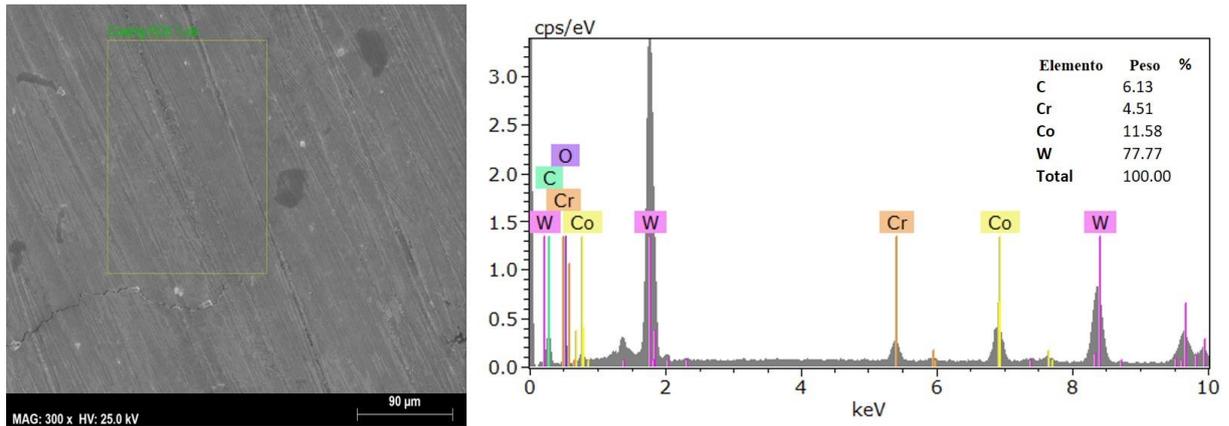


Figura 53 – Resultado da análise EDS sobre o primeiro lote de corpos-de-prova recebidos com revestimento protetor WC-CoCr.

Essa análise química (Figura 53) foi realizada sobre o primeiro lote de corpos-de-prova recebidos no IST em 2017. A presença de Carbono pode ser explicada pelo fato de ter sido realizado um polimento manual de preparação do corpo-de-prova para análise química, com lixas SiC, pois o polimento realizado pela empresa Rijeza não garantiu uma superfície homogênea em sua totalidade. Ao contatar a empresa, a mesma relatou que aplicou o revestimento sobre a superfície bruta do lingote de alumínio A356.0 T6/AlSi₇Mg_{0,3}, fato que resultou em uma maior rugosidade superficial. Já o segundo lote dos corpos-de-prova foram aspergidos sobre a superfície resultante do corte do lingote (mais lisa) e foi definido um polimento mais intenso, resultando em uma camada de revestimento livre de imperfeições e na ordem de 0,5 mm.

5.4 FASE 3 – ENSAIOS EROSIVOS PRÉ CORROSÃO

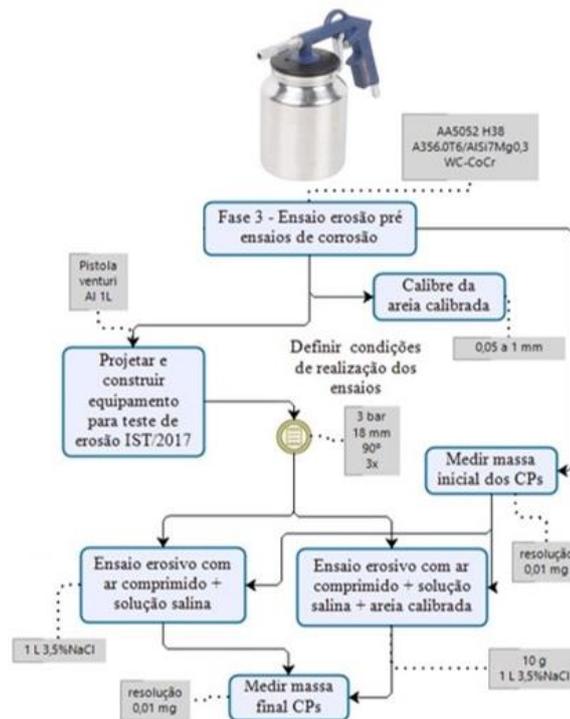


Figura 54 – Detalhamento do fluxograma da parte experimental da Tese (Fase 3).

O objetivo principal da primeira fase dos ensaios de erosão realizados em 2017, no IST, foi tão somente obter superfícies desgastadas para posterior análise de corrosão por EIE. O equipamento utilizado para realização desses ensaios foi apresentado na Figura 42. Além da preparação das superfícies, foram medidas as perdas de massa para comparação e compreensão dos níveis de desgastes obtidos de acordo com os erodentes utilizados. O ar comprimido foi utilizado como fluido de trabalho em conjunto com uma solução salina de 3,5% NaCl (massa) para simular o impacto de gotas e também com a solução salina em conjunto com areia calibrada de granulometria de 0,05 mm a 1 mm foram utilizados como erodentes. Nessa etapa não foi realizado ensaio erosivo somente com areia calibrada (ensaio a seco).

A distância do bico da pistola ao corpo-de-prova foi definida em 18 mm (limitação de acordo com os furos da cantoneira perfurada galvanizada). A pressão utilizada foi de 3 bar. O tempo de ensaio foi definido pelo volume do reservatório da pistola e girava em torno de 60 s. Quando utilizado areia calibrada, o máximo permitido por ensaio era 10 g, mais do que isso o agitador magnético utilizado não era capaz de manter a mistura de erodentes. Em concordância com a distância do bico da pistola ao corpo-de-prova (18 mm) e a pressão do ar

comprimido utilizada (3 bar), a área de desgaste em todos os corpos-de-prova foi em torno de 0,8 cm².

A metodologia aplicada nesses ensaios de erosão compreendeu a medição da massa dos corpos-de-prova em balança de precisão, a execução de três ensaios erosivos seguidos (devido a limitação do reservatório da pistola) e a posterior medição da massa dos corpos-de-prova a fim de se obter a perda de massa resultante do desgaste ocorrido. Dois tipos de ensaios foram realizados em cada tipo de superfície: no primeiro ensaio, utilizou-se somente o ar comprimido com 1 L de solução salina (3x); e no segundo ensaio foi acrescentada areia calibrada, formando uma mistura com a solução salina (3x). Esclarece-se que tais ensaios não foram exaustivamente repetidos a fim de validação de resultados erosivos porque nessa etapa não se pretendia caracterizar o comportamento do desgaste erosivo sobre as superfícies, mas sim caracterizar as cicatrizes resultantes de cada erodente utilizado, de forma a replicar as condições de teste a cada ensaio.

A preparação desses corpos-de-prova serviu para garantir um acabamento de superfície padronizado, tendo sido utilizado o mesmo grau de lixa para ambos os corpos-de-prova na máquina de polimento. Os ensaios de desgaste erosivo pré-corrosão incidiram sobre o substrato A356.0 T6/AlSi₇Mg_{0,3} com e sem revestimento protetor aplicado por HVOF de WC-CoCr e sobre o material removido da própria turbina da COP (AA5052 H38), sendo esse com dimensões fora dos padrões retangulares dos corpos-de-prova. As diferentes superfícies desgastadas por erosão, tanto pelo fato de se utilizar dois conjuntos de erodentes (impacto de gotas e impacto de gotas com partículas sólidas) como por utilizar corpos-de-prova de materiais diferentes, foram preparadas para realização de ensaios de corrosão por EIE. Esclarece-se que a fins de análise de corrosão ocorrida na COP os corpos-de-prova utilizados nos ensaios de corrosão da fase 4 foram o revestimento protetor WC-CoCr e o alumínio AA5052 H38, ambos com e sem desgaste erosivo (jato de ar com solução salina e areia calibrada usados em conjunto). Optou-se por não realizar EIE sobre superfície com desgaste erosivo somente por solução salina, pois a quantidade de material AA5052 disponível para os ensaios era somente a pequena amostra removida de uma das pás da turbina. Dessa forma, a mesma superfície desse material que passou pelo ensaio erosivo por solução salina teve que passar pelo ensaio erosivo com solução salina em conjunto com areia calibrada posteriormente. Resultando em somente um corpo-de-prova do material AA5052 com desgaste e outro sem desgaste. O mesmo ocorreu com o revestimento WC-CoCr cujo material

disponível era somente uma face de um corpo-de-prova A356.0 T6/AlSi7Mg_{0,3} fabricado no primeiro lote pela Rizeja e com polimento incompleto.

5.5 FASE 4 – ENSAIOS DE CORROSÃO

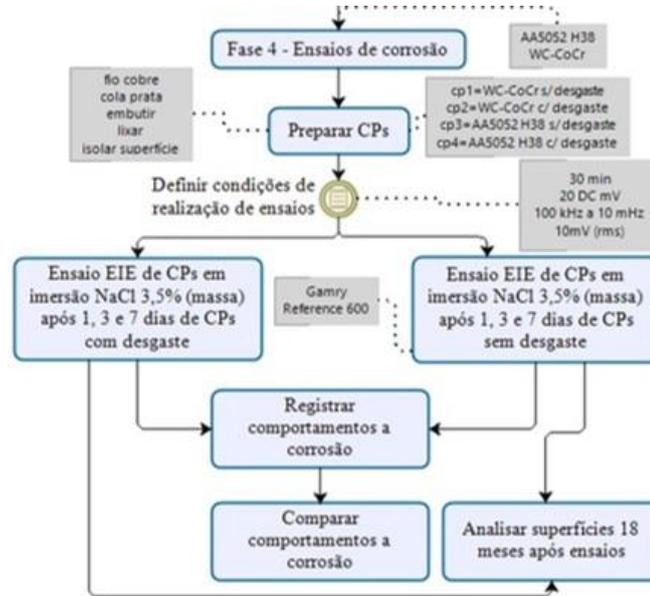


Figura 55 – Detalhamento do fluxograma da parte experimental da Tese (Fase 4).

Para os ensaios de corrosão se utilizou a técnica de EIE, com o potenciostato Gamry Reference 600 controlado por um laptop usando o software Gamry Framework, instalado no Laboratório de Electroquímica do IST. Quatro tipos de amostras foram preparados conforme a Tabela 11.

Tabela 11 – Amostras e suas respectivas áreas utilizadas na realização dos ensaios de EIE.

| AMOSTRAS DE ALUMÍNIO | ÁREA (cm ²) |
|---------------------------------------|-------------------------|
| cp1 = WC-CoCr sem desgaste erosivo | 0,3000 |
| cp2 = WC-CoCr com desgaste erosivo | 0,1961 |
| cp3 = AA5052 H38 sem desgaste erosivo | 0,2478 |
| cp4 = AA5052 H38 com desgaste erosivo | 0,2050 |

Foram também realizados ensaios de corrosão sobre o substrato da liga A356.0 T6/AlSi7Mg_{0,3}, no entanto, os resultados não serão apresentados por se tratar de um material diferente do utilizado nas pás da turbina da COP. Já que durante a pesquisa foi obtido material

da própria turbina para análise, o foco dessa etapa foi compará-lo ao revestimento protetor sugerido.

A preparação das amostras compreendeu o isolamento parcial da superfície frontal, definindo uma área que foi exposta ao ambiente. Para isso, um contato elétrico foi realizado por meio de fio condutor de cobre e cola de prata na zona posterior (Figura 56a), fechando o circuito entre a superfície a ser exposta e o fio de cobre. Na sequência, foram embutidas em resina epóxi e, depois de secas, foram lixadas e o isolamento final da superfície superior foi feito com verniz (Figura 56b), garantindo que apenas uma área superficial conhecida ficasse em contato com o meio externo.

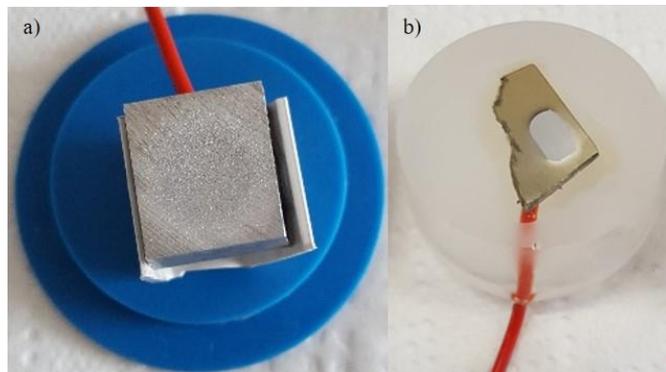


Figura 56 – Amostra já com fio condutor colado na parte posterior sendo adaptada em um suporte para preenchimento com resina epóxi (a) e amostra (cp3 = AA5052 H38 sem desgaste erosivo) já embutida em resina epóxi, lixada e com verniz delimitador de área de contato (b).

A Figura 57 apresenta o resultado final da etapa de preparação dos outros três corpos-de-prova cp1 = WC-CoCr sem desgaste erosivo (a), cp2 = WC-CoCr com desgaste erosivo (b) e cp4 = AA5052 H38 com desgaste erosivo (c).

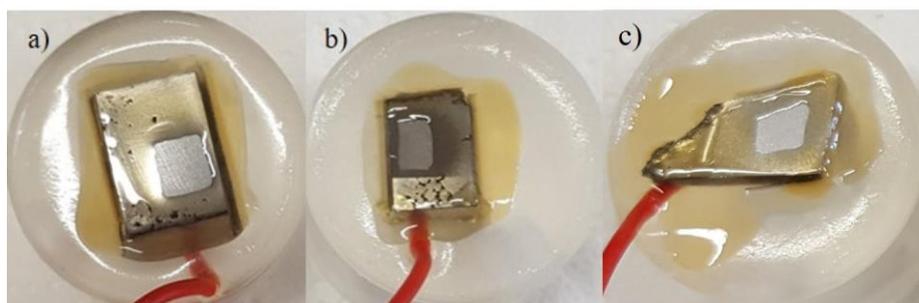


Figura 57 – Alguns corpos-de-prova prontos para serem utilizados nos ensaios EIE.

Os ensaios de corrosão foram planejados para a avaliação e o acompanhamento do processo corrosivo das superfícies ao longo da sua imersão em solução salina de 3,5% (massa), logo após imersão e após, 1 dia, 3 dias e 7 dias. A Figura 58 apresenta a disposição dos equipamentos utilizados na realização dos ensaios.



Figura 58 – Balão de cinco tubuladuras utilizado nos ensaios de EIE.

As medidas de impedância eletroquímica foram realizadas usando-se um sinal senoidal com frequência variando entre 10 mHz e 100 kHz, com amplitude de perturbação de 10 mV (rms) em torno do potencial de circuito aberto. Essas medidas de OCP e EIE foram feitas utilizando-se uma célula eletroquímica de vidro contendo o eletrodo de trabalho (liga de alumínio), um contra eletrodo retangular de platina e um eletrodo de calomelanos saturado como eletrodo de referência (SCE - *Saturated Calomel Electrode*).

5.6 FASE 5 – ENSAIOS DE EROSIÃO

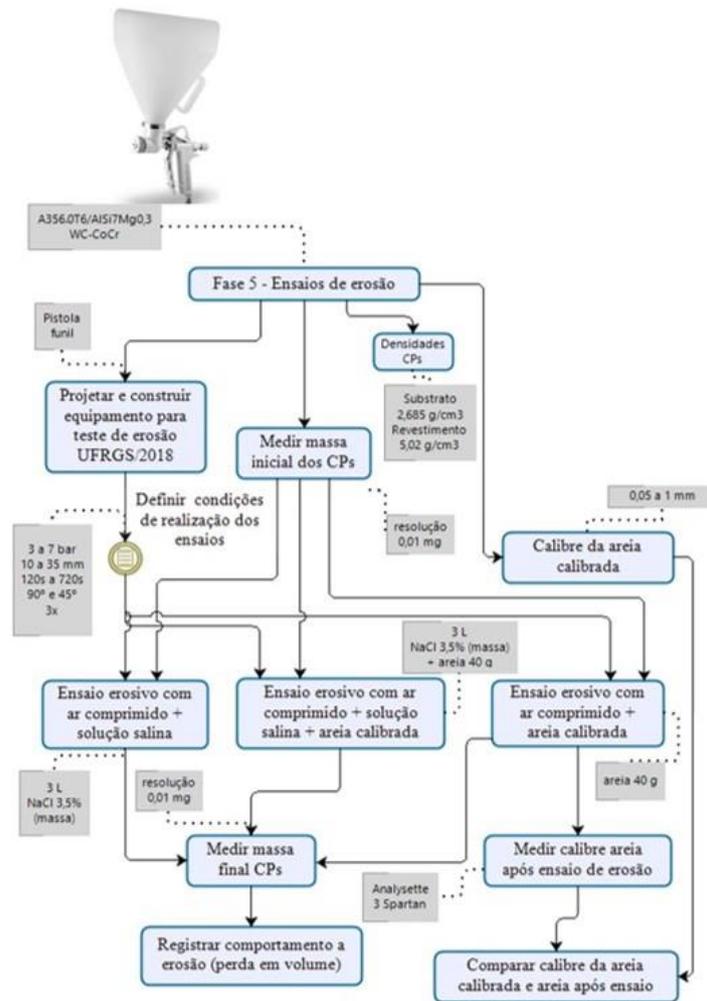


Figura 59 – Detalhamento do fluxograma da parte experimental da Tese (Fase 5).

A realização de novos ensaios erosivos utilizando o equipamento apresentado nas Figuras 43 e 44 objetivou explorar os testes e as gamas de variáveis dos processos que envolvem o sistema tribológico no qual a turbina da COP está inserida. Na erosão por partícula sólida, o material é removido pela ação mecânica de partículas, normalmente mais duras, que incidem sobre uma superfície de um material alvo. Já a erosão de gotas, dependendo da velocidade de impacto, pode também causar dano, porém seus efeitos fenomenológicos são completamente distintos. Como visto anteriormente, no capítulo 3 deste trabalho, no balanço energético do impacto de uma partícula sólida sobre a superfície do material, parte dessa energia é transformada em calor, parte em desgaste da superfície do material e outra parte retorna em forma de energia cinética translacional, de acordo com o ângulo de incidência desse jato. Já no impacto com erodente líquido, o mesmo se comprime e

se dissipa ao redor do ponto de colisão e não há transformação dessa energia em calor (HUTCHINGS, 1977).

Os ensaios foram realizados sobre os corpos-de-prova A356.0 T6/AlSi₇Mg_{0,3} com e sem revestimento WC-CoCr. Os erodentes utilizados foram novamente o ar comprimido como fluido de trabalho, a solução salina e a areia calibrada adicionadas. Entretanto, com o segundo equipamento construído especificamente para essa finalidade (com reservatório aberto), foi possível realizar também testes somente com a areia calibrada. Dessa forma, ao todo três tipos de erodentes foram utilizados; uma solução salina (impacto de gotas sobre a superfície), uma mistura de solução salina com areia calibrada e a areia calibrada. O compressor de ar utilizado foi o Pratic-Air-CSA-8.2-25 de pistão, da marca Schulz.

A metodologia desses ensaios difere da realizada na primeira fase de ensaios erosivos, pois nessa fase a perda de volume após jateamento de erodentes na superfície de um material é que foi analisada, já que a densidade do alumínio A356.0 T6/AlSi₇Mg_{0,3} não é igual à do revestimento WC-CoCr. Utilizou-se uma balança de precisão, com resolução de 0,01 mg, para a medição da perda de massa ocorrida após testes de erosão (3 vezes para cada condição de ensaio) sobre os corpos-de-prova, sendo esse valor dividido pela densidade de cada um dos materiais com vista à obtenção do volume desgastado. Após se obter os valores de perda de volume dos três corpos-de-prova para cada condição de ensaio, uma média desses valores definia o valor a ser considerado como desgaste erosivo. Utilizou-se valores densidades de 2,685 g/cm³ para o alumínio A356.0 T6/AlSi₇Mg_{0,3} e de 5,02 g/cm³ para o revestimento WC-CoCr.

A duração dos testes de erosão foi selecionada de acordo com o tipo e a quantidade de erodente utilizado. Estabeleceu-se uma relação de 40 g de areia calibrada, 3 L de solução salina e a mistura de ambos para se obter um jato de gotículas com presença de particulado sólido. O reservatório da pistola, por ser aberto, possibilitou a adição dessas quantidades de erodentes e o controle durante a realização do ensaio, permitindo a visualização instantânea do processo. Utilizou-se variações de pressão, assim como de distâncias entre o bico da pistola e o corpo-de-prova e de quantidade de erodentes.

Nos ensaios com solução salina, para se obter um comportamento livre de turbulência resultante do contato da solução salina com o fluxo de ar comprimido no interior do reservatório, iniciava-se o ensaio com volume inicial de 0,5 L no reservatório da pistola e tão logo era observada a uniformidade da vazão da solução salina, adicionava-se o volume

restante de 2,5 L. Nos ensaios com areia calibrada, utilizou-se o dosador do reservatório secundário para se obter a inserção constante no reservatório da pistola. Já nos ensaios realizados com a areia calibrada e a solução salina simultaneamente, foram utilizadas de forma conjunta as técnicas individualizadas ora apresentadas.

A maioria do particulado sólido responsável pelo desgaste erosivo, na prática, tem formato equiaxial. Porém, pode haver uma variação considerável na sua forma e na angulosidade das partículas, ainda se tratando de areia calibrada. Essa areia pode ganhar ou perder massa com o impacto na superfície do material, bem como com o impacto entre os próprios grãos sobre efeito do ricocheteamento. A areia calibrada foi coletada, durante os ensaios erosivos, a fim de se comparar a sua granulometria inicial com a sua granulometria após o impacto.

Os resultados dos ensaios de erosão normalmente têm elevado desvio padrão devido a sua dificuldade de repetição, no entanto isso não impede a identificação do comportamento dos mecanismos de desgaste em função das modificações de variáveis de processo e de tipos de erodente. Buscou-se caracterizar as perdas de massas resultantes dos ensaios erosivos por meio de gráficos que indicam o grau de contribuição e as diferentes características apresentadas em cada tipo de ensaio erosivo realizado.

Capítulo 6

Resultados e Discussão

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL E DA NATUREZA DOS PROCESSOS DE DEGRADAÇÃO OCORRIDOS NA TURBINA DA COP

A análise elementar por EDS da amostra de material recolhida das pás da turbina da COP revelou que 94% da amostra é alumínio, com baixo teor de magnésio 1,25%, características fortes das ligas de série 5xxx (Al-Mg), 6xxx (Al-Mg-Si) e 3xxx.x (Al-Si-Mg). Entretanto, não foi observado nenhum pico de silício, o que despertou um alerta, já que havia sido utilizado alumínio A356.0 T6/AlSi₇Mg_{0,3} para preparação de corpos-de-prova e aplicação de revestimento protetor. A Figura 60 apresenta esses resultados.

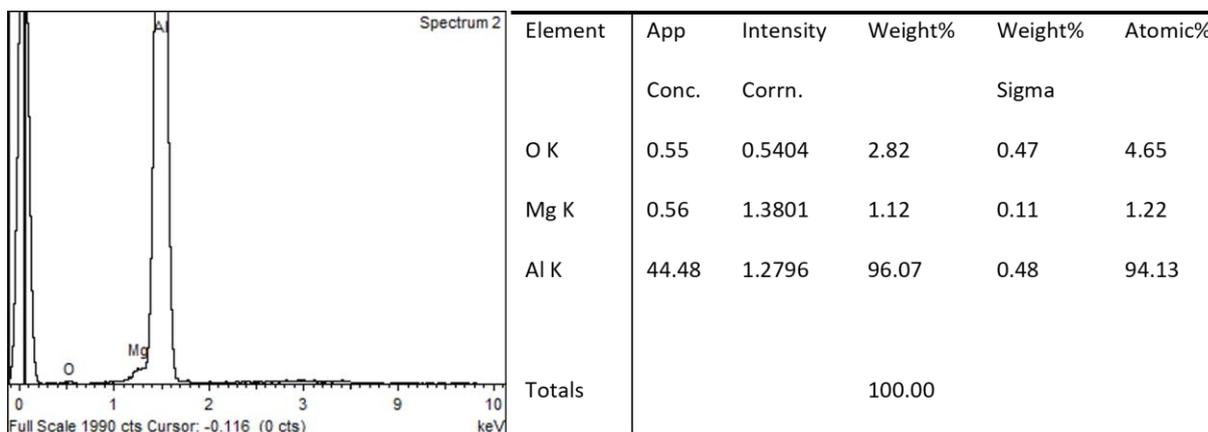


Figura 60 – Resultado da análise EDS sobre a amostra da pá da turbina da COP.

Já a metalografia revelou as disposições de contorno de grão em estrutura alongada com baixo teor de Mg e muito oxidada (zonas pretas). Indicando, muito provavelmente, tratar-se de uma liga que endurece por solução sólida (Mg em solução no Al) e não por precipitação, encruando após a deformação plástica. Novamente percebeu-se ausência de precipitados de silício na microestrutura, que normalmente são bem abundantes quando existentes, descartando as ligas das séries 6xxx (Al-Mg-Si) e 3xxx.x (Al-Si-Mg). Dessa forma, restaram as ligas da série 5xxx (Al-Mg) e comprovou-se que a ideia inicial que se tinha, inclusive com informações da fabricante dessa turbina, de que o material das pás era o alumínio A356.0 T6/AlSi₇Mg_{0,3} estava errada. A Figura 61 apresenta o resultado da metalografia para duas distâncias 100 µm e 50 µm, onde os pontos escuros representam porosidade.

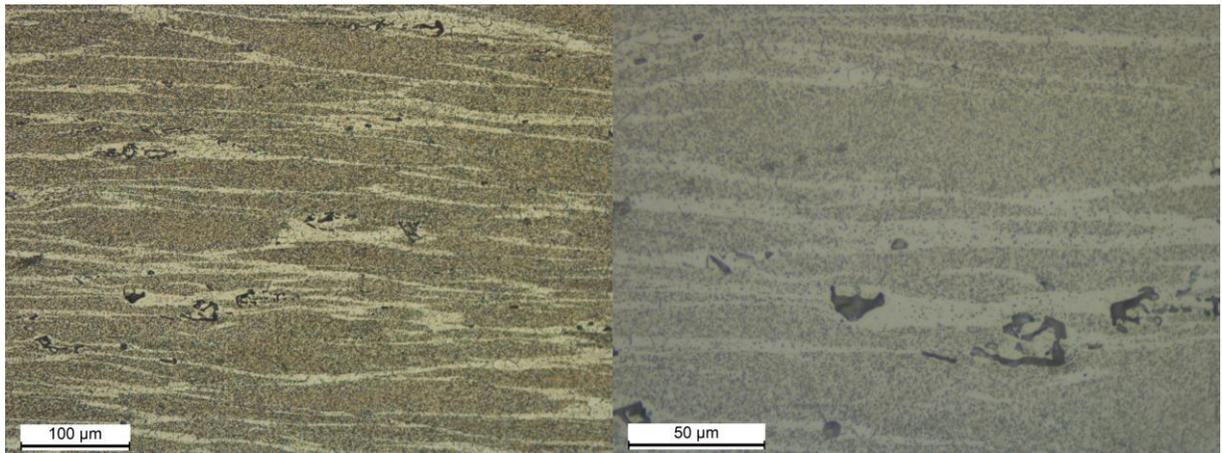


Figura 61 – Resultado da análise metalográfica sobre a amostra da pá da turbina da COP.

O resultado da difratometria de raios X (DRX) forneceu a informação das fases cristalinas presentes, sendo possível ver somente picos de fase rica em Al, pois a quantidade de precipitados de Mg é demasiada pequena para ser detectada. Os autores (PATTHAIK; DAS; JHA; PRASANTH, 2015) também não encontraram qualquer pico correspondente a fases contendo Mg. A Figura 62 mostra os picos de difração de raios-X típicos do alumínio, em particular, os picos característicos em 2θ igual a $38,6^\circ$; $44,8^\circ$; $65,1^\circ$; $78,2^\circ$ e $82,5^\circ$; correspondendo aos planos cristalográficos (111), (200), (220), (311) e (222) respectivamente.

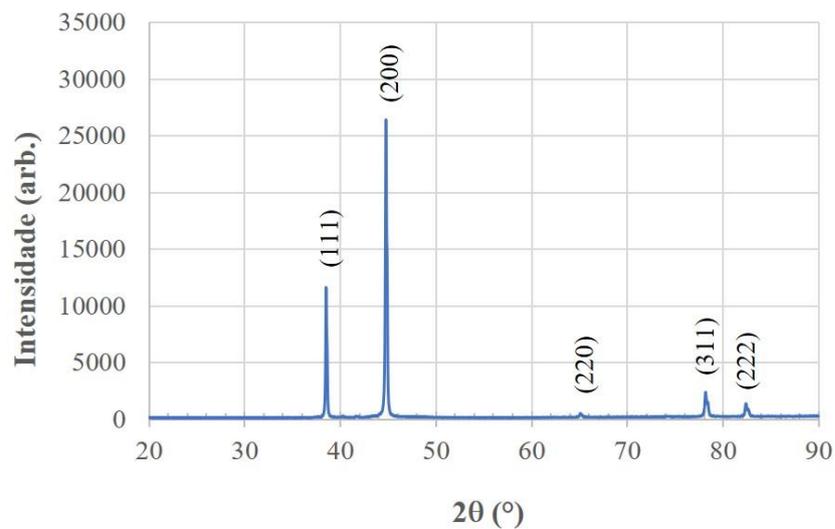


Figura 62 – Difratograma obtido da amostra da pá da turbina da COP.

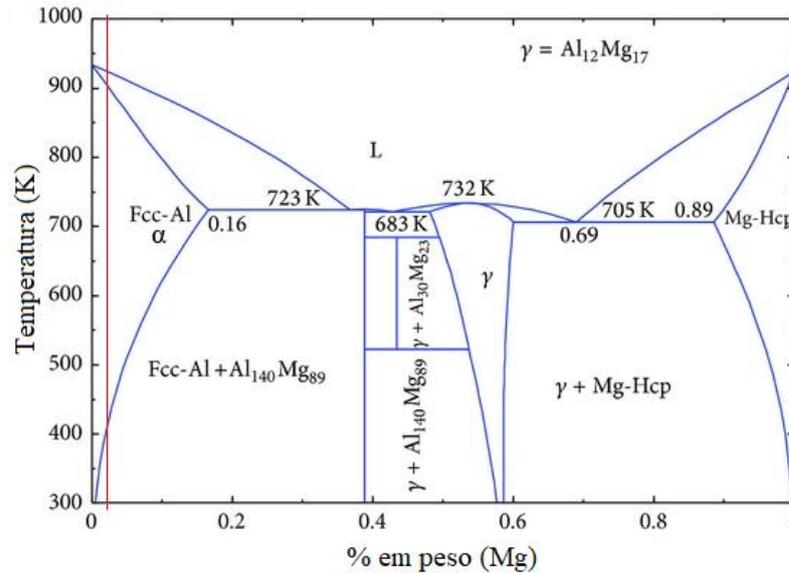


Figura 63 – Diagrama de fases para ligas Al-Mg.

Ao serem comparados os resultados obtidos no ensaio de DRX com o diagrama de fases da liga de Alumínio-Magnésio (Figura 63) pode-se constatar a presença de uma única fase primária (α) com estrutura cristalina FCC-Al, uma vez que o magnésio permanece na solução sólida e não forma nenhuma fase (PATTNAIK; DAS; JHA; PRASANTH, 2015).

Os resultados das medidas de microdureza Vickers, com valores de 85,7 HV, 86,2 HV e 90,0 HV, correspondentes a um valor médio de 87 HV para essa amostra do material.

A partir dos resultados das análises por EDS, metalografia, microdureza e DRX, chegou-se à liga de alumínio 5052 H38. Essa liga tem como característica uma boa resistência à corrosão, boas propriedades mecânicas e é soldável.

A liga de alumínio 5052 H38, também designada como ISO AlMg_{2,5}, tem como segundo elemento maioritário o magnésio e é utilizada com o principal objetivo de resistir à corrosão. Na sua nomenclatura, a designação H38 permite concluir que está liga sofreu encruamento e foi tratada termicamente a baixa temperatura (H3), sendo que o 8, em H38, significa que o endurecimento foi efetuado na sua totalidade. Esta liga possui uma quantidade significativa de Cr, o que, além de melhorar um pouco as características de resistência à corrosão, evita o crescimento do tamanho de grão, conferindo-lhe melhores características mecânicas. A sua composição química pode ser analisada na Tabela 12.

Tabela 12 – Composição química da liga de alumínio 5052 H38 (% peso). (DAVIS; ASSOCIATES; COMMITTEE, 1993).

| Al | Si | Mg | Cu | Cr | Fe | Zn | Mn |
|-------|------|---------|-----|-----------|-----|-----|-----|
| 96-97 | 0,25 | 2,2-2,8 | 0,1 | 0,15-0,35 | 0,4 | 0,1 | 0,1 |

Na sequência, apresenta-se na Tabela 13 o resumo de algumas propriedades mecânicas bem como o ponto de fusão da liga de alumínio 5052 H38.

Tabela 13 – Propriedades mecânicas e ponto de fusão da liga de alumínio 5052 H38. (DAVIS; ASSOCIATES; COMMITTEE, 1993).

| Tensão limite de escoamento a 0,2% (MPa) | Resistência à tração (MPa) | Dureza Vickers (HV) | Resistência à Fadiga (MPa) | Temperatura de Fusão (°C) |
|------------------------------------------|----------------------------|---------------------|----------------------------|---------------------------|
| 221-244 | 269-297 | 80-90 | 135-144 | 604-648 |

Esse trabalho de pesquisa já estava em andamento com o alumínio A356.0 T6/AlSi₇Mg_{0,3}, indicado por um dos engenheiros remanescentes da Voith Hydro e fornecido pela ABAL – Associação Brasileira do Alumínio, no âmbito do Projeto ABAL Alumínio nas Escolas, que visa disseminar o ensino, a pesquisa e a inovação tecnológica do alumínio no meio acadêmico. Os ensaios planejados nessa pesquisa correspondem a análises de corrosão e erosão. Os ensaios de corrosão puderam ser realizados sobre a amostra removida da turbina, já os ensaios de erosão seguiram com o alumínio A356.0 T6/AlSi₇Mg_{0,3}, pois suas propriedades mecânicas (ver Tabelas 6 e 7) são semelhantes às da liga de alumínio 5052 H38 (ver Tabelas 12 e 13), descoberta nessa pesquisa como material utilizado na fabricação da turbina da COP. Dessa forma, estima-se que os resultados conclusivos dos ensaios de desgaste erosivo dessa pesquisa não seriam significativamente alterados pela continuidade do uso de uma liga de alumínio similar àquela da COP.

A degradação causada pela interação físico-química entre o material e o meio em que se encontra leva a alterações prejudiciais e indesejáveis, tais como: desgaste, transformações químicas ou modificações estruturais, podendo, inclusive, tornar o material inadequado para o uso (GENTIL, 2007). A Figura 64 apresenta uma das pás da turbina da COP, onde é evidenciando a ação da erosão/corrosão através de inúmeras crateras na sua superfície, bem como a perda de material das bordas da pá.

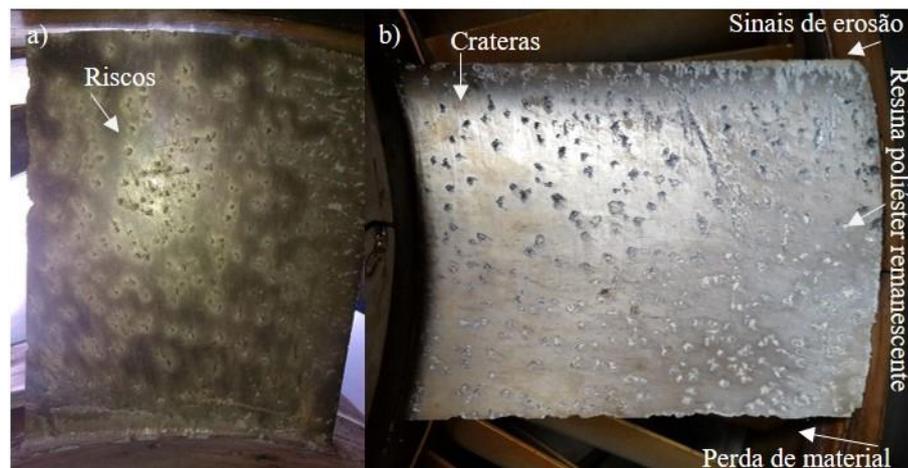


Figura 64 – Turbina da COP em outubro de 2017: lado mar apresentando rugosidades menores em relação ao lado terra, seguidas de riscos pela ação de ondas Rayleigt (a) e lado terra com rugosidades heterogêneas e de maiores dimensões (b).

A Figura 65 apresenta a dimensão das crateras na superfície de uma das pás da COP.



Figura 65 – Dimensões das rugosidades da pá da turbina da COP, algumas ainda com resina de poliéster aplicada na tentativa de preencher e restaurar a superfície lisa.

A Figura 66 apresenta os resultados obtidos para medições de rugosidade superficial para as superfícies com área lisa da pá da COP, área com pite da pá da COP e pá de reserva da COP. A Tabela 14, na sequência, expõe um quadro resumo dos resultados.

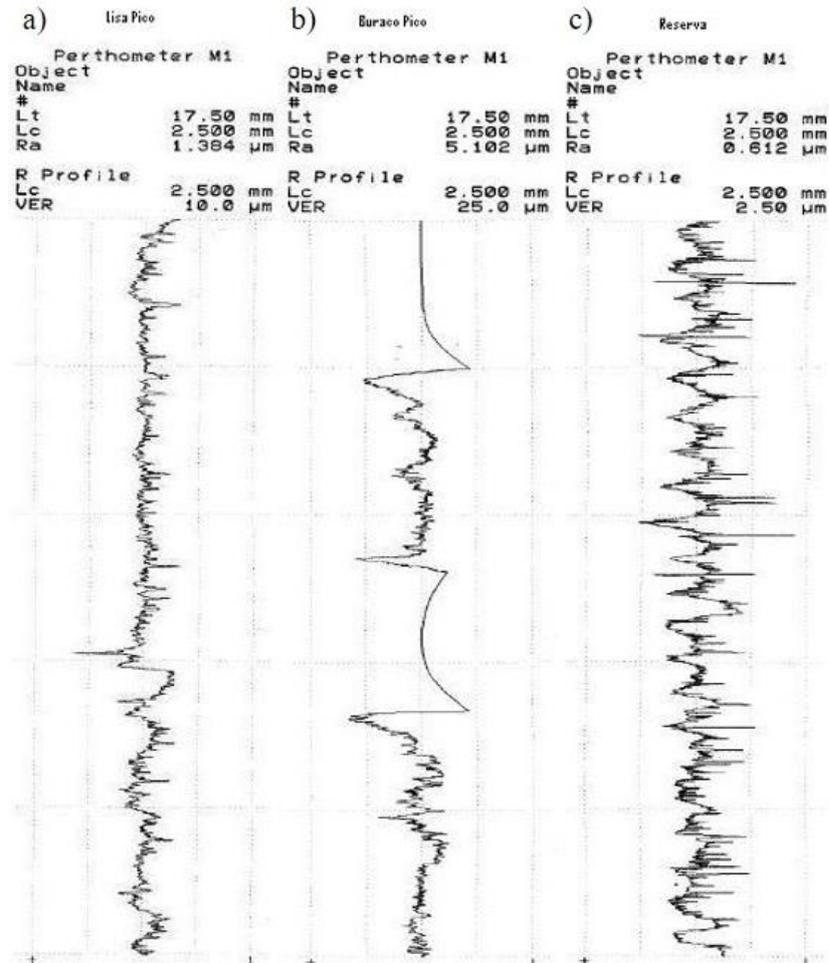


Figura 66 – Comparação entre os perfis de rugosidades para as diferentes superfícies a) área lisa da pá, b) área com pite e c) pá de reserva.

Da comparação dos perfis de rugosidade apresentados, percebe-se que a superfície da pá da turbina da COP, mesmo em área aparentemente mais lisa, demonstra um aspecto de rugosidade, seja por pite de corrosão, seja por microfissura de desgaste erosivo. Inclusive o valor de Ra para área com pite deve ser muito superior ao valor mensurado, pois os dois saltos evidenciados nesse perfil (Figura 66b) significam que o equipamento não considerou tal valor devido a extrapolação da capacidade de leitura do rugosímetro utilizado. A presença dessas imperfeições superficiais acelera o desgaste.

Tabela 14 – Comparativo de valores médios da rugosidade superficial (Ra) das superfícies analisadas.

| Superfície | Ra |
|------------|---------------------|
| Lisa | 1,384 μm |
| Pit | 5,102 μm |
| Reserva | 0,612 μm |

Os resultados correspondentes aos ensaios EIE realizados diretamente na pá da turbina da COP (zona fortemente atacada por pite e zona mais limpa) são mostrados nos diagramas de Nyquist e Bode da Figura 67.

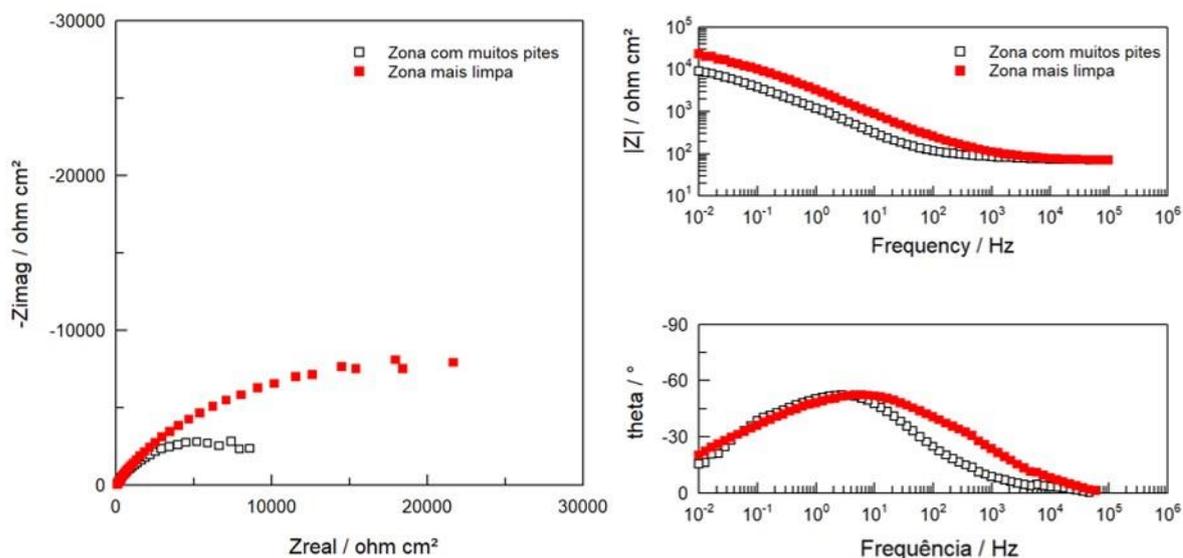


Figura 67 – Espectros de impedância eletroquímica para duas zonas (zona fortemente atacada por pite e mais limpa) de uma pá da turbina da COP, obtidos no local, em água do mar.

Em ambos os casos, os espectros são típicos de um sistema de ataque por pite. Duas constantes temporais podem ser distinguidas no diagrama de Bode, uma em frequências mais altas, relativa às características do filme de óxido, e a outra em baixa frequência, que é a impressão digital usual de um processo de pite.

A diferença entre os espectros obtidos nos diferentes locais é refletida principalmente pelo tamanho do arco no diagrama de Nyquist ou no módulo de impedância em baixas frequências no diagrama de Bode, ambos indicando que a zona mais limpa mostra uma maior

resistência, como esperado, uma vez que o óxido, mesmo após regenerar-se não consegue alcançar espessuras como havia originalmente.

Ambos os espectros podem estar associados ao circuito elétrico equivalente da Figura 33b, correspondendo a um material com pite formado, por isso mesmo a área mais limpa está experimentando corrosão por pite. Assim, este circuito equivalente foi usado no ajuste numérico para obter a informação quantitativa no sistema.

A configuração exata do circuito equivalente é descrita na Figura 68. Aqui, os capacitores foram substituídos por elementos de fase constante (CPE), que correspondem a um conceito generalizado que permite a conta de superfícies porosas ou heterogêneas. De fato, a impedância de um CPE, $Z=1/[Y_o(j*\omega)^n]$, pode corresponder a um capacitor ideal, $Z = 1/(j\omega C)$, quando $n=1$, a um resistor, $Z=R$, quando $n=0$, ou a um indutor, $Z=j\omega L$, quando $n=-1$, enquanto outros processos físicos, como difusão, podem corresponder a valores intermediários de n .

Foi obtido um ajuste adequado para ambos os espectros, como mostrado na Figura 69, para o caso da zona fortemente atacada por pite, também corroborado pelo baixo valor do χ^2 , utilizado como parâmetro de qualidade de ajuste e correspondente ao quadrado do desvio padrão entre os dados originais e os valores de ajuste.

Os valores dos parâmetros ajustados para ambas as zonas amostradas são apresentados na Tabela 15.

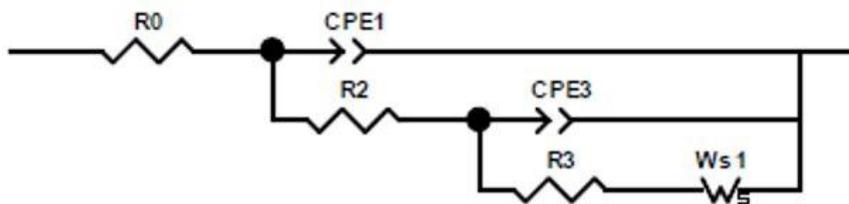


Figura 68 – Circuito elétrico equivalente utilizado na montagem dos espectros de impedância da Figura 69.

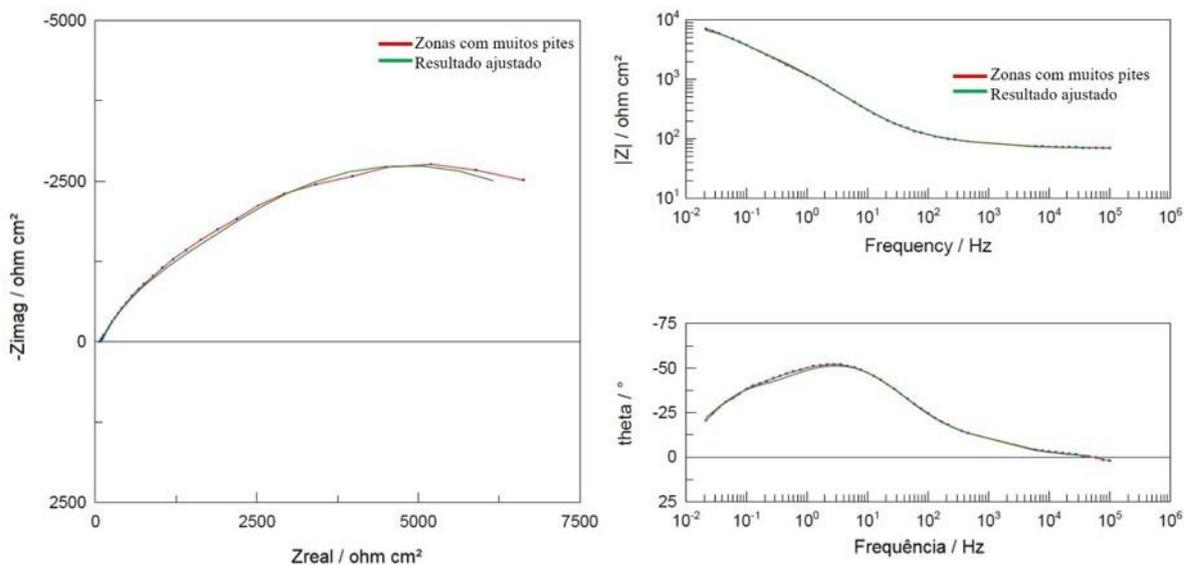


Figura 69 – Ajuste do espectro da impedância para a zona pesadamente atacada por pite ao circuito equivalente elétrico proposto.

Tabela 15 – Parâmetros ajustados para os espectros da impedância de zonas pesadamente atacada por pite e mais limpas, usando o circuito equivalente elétrico da Figura 68.

| | Zona limpa | Zona fortemente atacada por pite |
|------------------------------------------------|------------|----------------------------------|
| $R_s/\Omega cm^2$ | 71 | 70 |
| $CPE_{\text{óxido}}-Y_o/\mu F s^{n-1} cm^{-2}$ | 20 | 86 |
| $CPE_{\text{óxido}}-n$ | 0,76 | 0,72 |
| $R'/\Omega cm^2$ | 130 | 63 |
| $CPE_{\text{pite}}-Y_o/\mu F s^{n-1} cm^{-2}$ | 71 | 99 |
| $CPE_{\text{pite}}-n$ | 0,59 | 0,74 |
| $R_{\text{pite}}/\Omega cm^2$ | 19340 | 3188 |
| $W_s-R/\Omega cm^2$ | 10711 | 5327 |
| W_s-T/s | 15,92 | 6,33 |
| W_s-P | 0,44 | 0,45 |
| χ^2 | 0,000544 | 0,000767 |

Os resultados de ajuste são claramente típicos de ligas de alumínio em condições de corrosão por pite, como esperado da análise inicial acima dos espectros. Além disso, os valores obtidos para cada parâmetro estão dentro dos valores típicos. De fato, apesar de não existir bibliografia abundante sobre a aplicação de EIE à liga 5052 em ambiente marinho, foi possível seleccionar dois artigos com estudos semelhantes, embora com vista ao estudo de inibidores de corrosão, mas utilizando como branco uma solução de NaCl 3% (ZHU; YANG; WANG; ZHANG *et al.*, 2019) e (LIU; WANG; GAO; ZHANG, 2016). Em um desses artigos (ZHU; YANG; WANG; ZHANG *et al.*, 2019) é usado um circuito equivalente pouco

coerente, do tipo Voigt, isto é, com associação em série de dois paralelos R - CPE , um relativo ao filme e outro ao processo de transferência de carga, circuito que não se aplica a uma situação de corrosão por pite. No segundo artigo (LIU; WANG; GAO; ZHANG, 2016) utiliza-se um circuito mais coerente, em escada, mas que não contempla a contribuição da transferência de massa (Warburg). Desta forma, apenas é possível comparar valores de resistência de polarização, R_p , sendo esta definida como a soma de todas as resistências do circuito, à exceção da resistência da solução. Os valores de R_p obtidos pelos autores desses artigos são de 14,40 k Ω cm² (ZHU; YANG; WANG; ZHANG *et al.*, 2019) e 11,83 k Ω cm² (LIU; WANG; GAO; ZHANG, 2016), ou seja, maiores do que os obtidos aqui para a “zona fortemente atacada por pite”, mas menores do que os obtidos para a “zona limpa”. É ainda de notar que os espectros apresentados no primeiro destes artigos não parecem ter sido obtidos nas melhores condições experimentais. Em particular, nota-se uma queda brusca do ângulo de fase às baixas frequências, normalmente devida a comportamento pseudo-indutivo característico dos problemas de linearidade associados à natureza autocatalítica do processo de pite, como já foi referido.

Comparando a resposta das duas zonas, algumas diferenças podem ser observadas. No que diz respeito aos parâmetros relacionados ao processo de pite, o Y_o de CPE_{pite} cresce com a densidade de pite aumentada, porque a área afetada pelo pite igualmente aumenta e a capacitância é dada por $C = \varepsilon \varepsilon_0 A/d$, válido para um capacitor paralelo da placa, onde ε seja a constante dielétrica, ε_0 a permissividade elétrica do vácuo, A , a área de superfície e d , a espessura do dielétrico. Assim, um aumento da área afetada pelo pite será refletido em um aumento de capacitância, como observado. Pelo contrário, os parâmetros associados aos processos faradaicos, representados pela resistência da reação de pite R_{pite} e pela resistência de transferência maciça, W_{dif} , deverão diminuir, devido ao mesmo aumento da área, e isso é observado nos resultados do ajuste.

No presente caso, o W_{dif} consiste em um elemento de Warburg finito generalizado, normalmente usado quando a espessura da camada de difusão é reduzida, e $W_{dif} - R$, $W_{dif} - T$ e $W_{dif} - P$ correspondem à equação $Z = R \cdot \tanh([j \cdot T \cdot \omega]^P) / (j \cdot T \cdot \omega)^P$. Também as mudanças em R refletem a área afetada pelo processo de pite, com valores inferiores sendo observados para a zona fortemente atacada por pite. O único parâmetro representativo da camada de óxido intacta (área limpa) é o $CPE_{óxido}$. Neste caso, as mudanças na área devido às densidades de pite diferentes não são significativas, porque esta área que corresponde ao óxido intacto é muito maior do que a área com pite. Assim, o aumento de Y_o observado para a área fortemente

atacada por pite deve estar na maior parte relacionado a uma diminuição na espessura do óxido que ocorre concomitantemente com o aumento na densidade de pite nas zonas onde o ataque corrosivo é mais severo.

Dos resultados acima e da discussão torna-se evidente que a superfície das pás da turbina da COP é completamente vulnerável ao ataque por pite, que ocorre espontaneamente em contato com água de mar. Assim, a degradação das pás deve ter envolvido um ataque corrosivo e não apenas o efeito do desgaste mecânico puro. Além disso, o fato de que até mesmo as zonas mais limpas mostram um padrão de pite nos testes EIE, mostra que o pite ocorreu na maior parte em toda a superfície das pás, embora a severidade do ataque possa ser diferente de local a local.

Essa visita técnica proporcionou a consolidação de muitos conceitos sobre o funcionamento da turbina, o seu ambiente de trabalho e suas particularidades. Uma das observações importantes foi o fato de que as pás do estator do lado mar, de aço inoxidável 316L, não apresentaram um desgaste tão expressivo como o apresentado nas pás da turbina, em alumínio 5052 H38. Lembrando que os estatores, tanto do lado mar como do lado terra (removido anos antes), são fixos e servem para direcionar o fluxo de ar para as pás da turbina, elevando a eficiência aerodinâmica do sistema. As fotos comparativas desse desgaste são apresentadas na Figura 70.

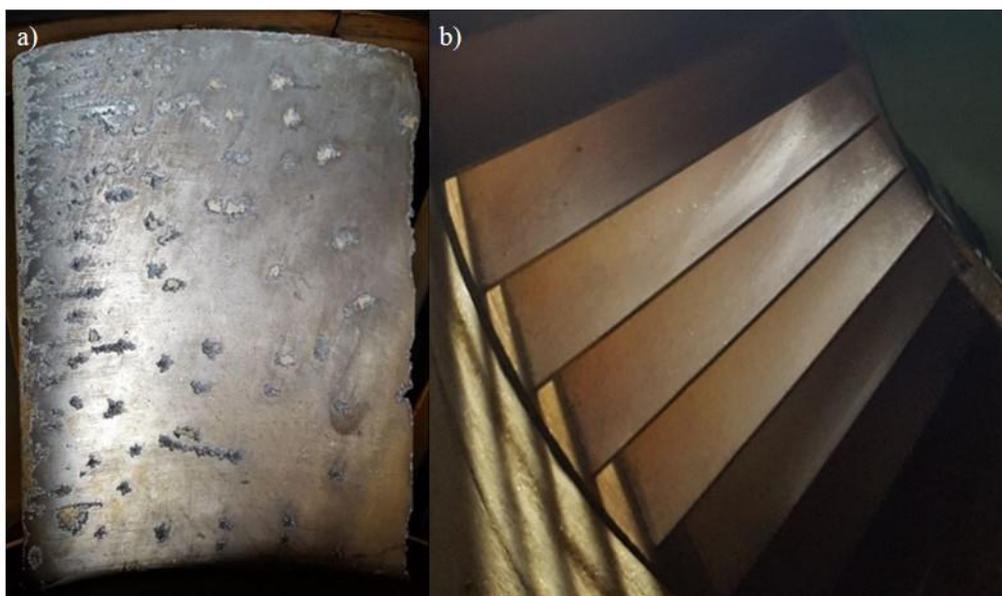


Figura 70 – Comparação entre a degradação de uma das pás da turbina da COP em alumínio 5052 H38 (a) e as pás do estator em aço inoxidável 316L (b).

O fato de o material aço inoxidável 316L, situado quase nas mesmas condições tribológicas, não apresentar degradação tão elevada quanto a das pás da turbina da COP indica que os revestimentos de Al_2O_3 fornecem proteções comparativamente pobres sob condições de erosão-corrosão.

6.2 AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO À CORROSÃO E À CORROSÃO COM DESGASTE

6.2.1 Preparação de amostras desgastadas para testes de corrosão

Nesta etapa procedeu-se ao desgaste erosivos de corpos-de-prova de A356.0 T6/ $\text{AlSi}_7\text{Mg}_{0,3}$, WC-CoCr e AA5052 H38 para depois serem submetidos a testes de corrosão. Os corpos-de-prova resultantes desse ensaio erosivo com solução salina e a adição da areia calibrada apresentaram superfícies irregulares, que posteriormente serviram para realização de análises de corrosão por EIE. Com o ensaio corrosivo pretende-se analisar as diferentes respostas, desses corpos-de-prova que sofreram desgaste erosivo em comparação aos corpos-de-prova sem a presença desse desgaste. As cicatrizes obtidas desses ensaios erosivos podem ser visualizadas na Figura 71.

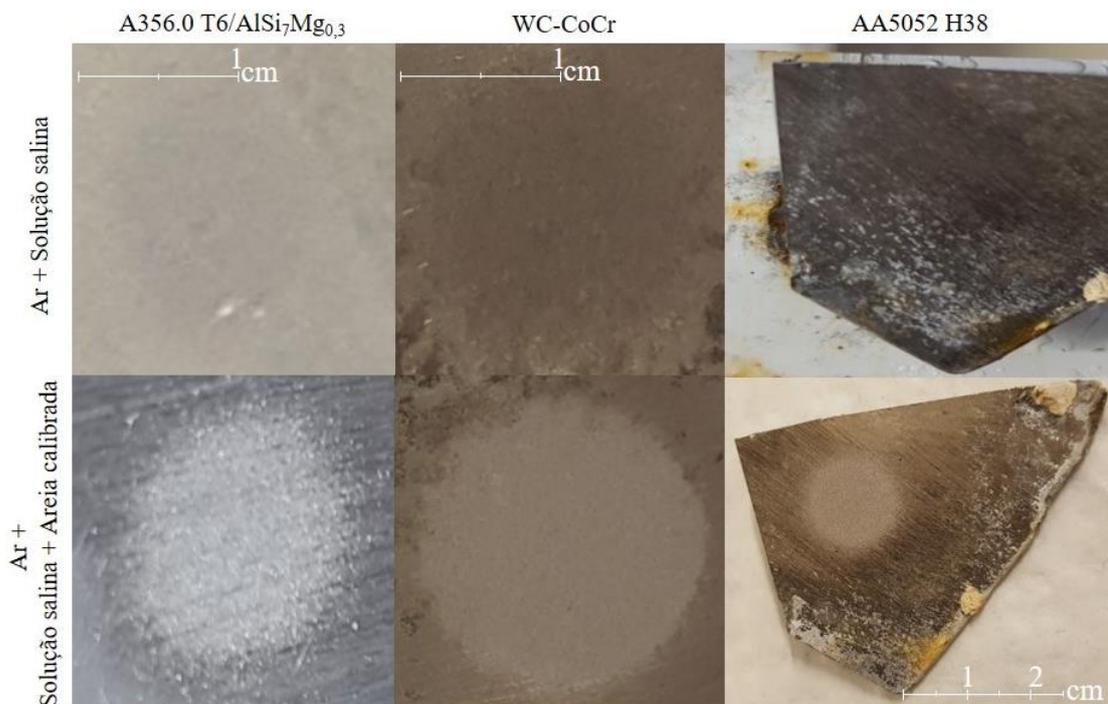


Figura 71 – Cicatrizes resultantes dos ensaios erosivos realizados.

Percebe-se que o desgaste erosivo com a utilização somente de solução salina é quase imperceptível para ambos os corpos-de-prova, diferentemente do desgaste com a areia calibrada adicionada ao ensaio. Isso fica ainda mais evidente na análise dos resultados em perda de volume. Enquanto o A356.0 T6/AlSi₇Mg_{0,3} apresentou $0,21 \times 10^{-4} \text{ cm}^3$ com solução salina, com a adição de areia calibrada o valor subiu para $1,63 \times 10^{-4} \text{ cm}^3$, bem como ocorrido na superfície do WC-CoCr cujos valores são $0,03 \times 10^{-4} \text{ cm}^3$ e $0,7 \times 10^{-4} \text{ cm}^3$ respectivamente. Nota-se que o desgaste ocorrido na superfície WC-CoCr é cerca de 2,3 a 7 vezes menor que sobre o A356.0 T6/AlSi₇Mg_{0,3}. Mesmo com as limitações do equipamento de ensaio erosivo utilizado, os resultados indicaram que a escolha do revestimento em WC-CoCr faz algum sentido, pelo menos na questão erosiva, por propiciar um menor desgaste.

6.2.2 Comportamento do substrato de AA5052 H38

Apresenta-se na Figura 72 a evolução temporal do comportamento do substrato AA5052 H38 em solução de NaCl 3,5%.

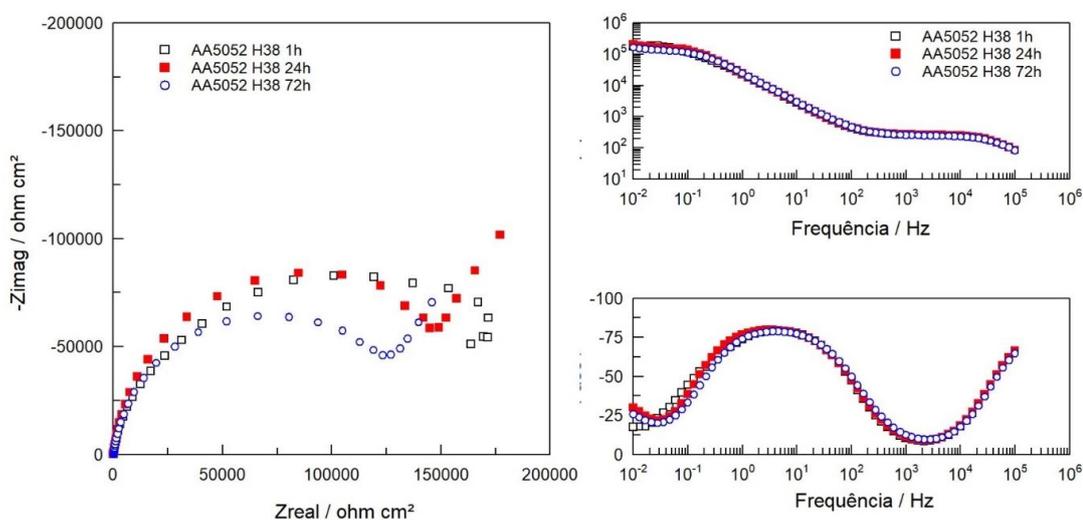


Figura 72 – Espectros de impedância do substrato AA5052 H38 (cp3) após imersão em NaCl 3,5% por 1h, 24h e 72h.

O material apresenta-se no seu estado passivo após 1h de imersão, mas verifica-se que ao fim de 24h de imersão já é evidente a iniciação da corrosão por pite, caracterizada pelo aparecimento de uma nova constante de tempo e, dessa forma, uma elevação do ângulo de fase às muito baixas frequências.

Quando o material é sujeito a ensaios de desgaste erosivo, as suas características superficiais e, em particular, o seu óxido protetor, são alterados como se pode avaliar na Figura 73, onde se compara o comportamento do substrato de AA5052 H38 tal qual e após desgaste erosivo, após 1h de imersão na solução salina.

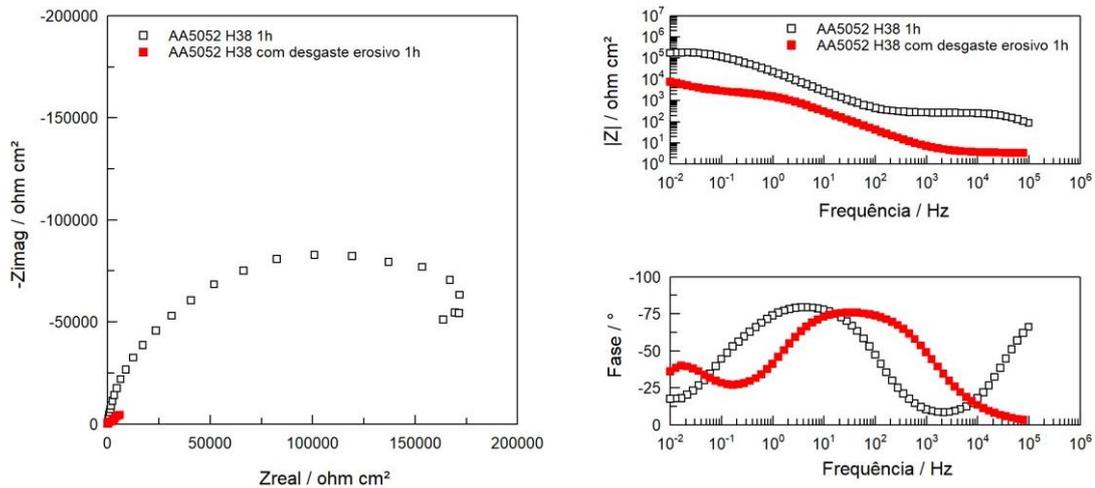


Figura 73 – Espectros de impedância do substrato AA5052 H38 com desgaste erosivo (cp4) e sem desgaste erosivo (cp3) após imersão em NaCl 3,5% por 1h.

Na Figura 73 é clara a redução dos valores de impedância devida ao desgaste, já que este conduz à remoção da proteção devida ao filme passivo que, embora reconstruído naturalmente ao ar, não retoma a espessura inicial. Por outro lado, pode verificar-se que, ao contrário da amostra sem desgaste, que, como foi referido, após 1h de imersão ainda não apresenta corrosão por pite, a amostra que sofreu desgaste já apresenta o referido espectro típico deste tipo de corrosão. É de assinalar a queda acentuada dos valores de impedância, patente no diagrama de Nyquist e que pode quantificar-se através do módulo da impedância medido às baixas frequências no diagrama de Bode, o qual diminuiu mais do que uma ordem de grandeza, desde 170 $\text{k}\Omega \text{ cm}^2$, na amostra original, para 7,4 $\text{k}\Omega \text{ cm}^2$, na amostra desgastada.

A Figura 74 apresenta a evolução temporal durante a imersão em NaCl 3,5% do substrato AA5052 H38 após desgaste erosivo. Como já foi referido, verifica-se a existência de corrosão por pite logo após 1h de imersão. Porém, a exposição continuada à solução salina parece permitir uma regeneração do óxido que, embora continuando a apresentar corrosão por pite, passa a apresentar uma maior impedância, parecendo também atenuar-se a constante de tempo relativa ao processo de ataque de corrosão por pite.

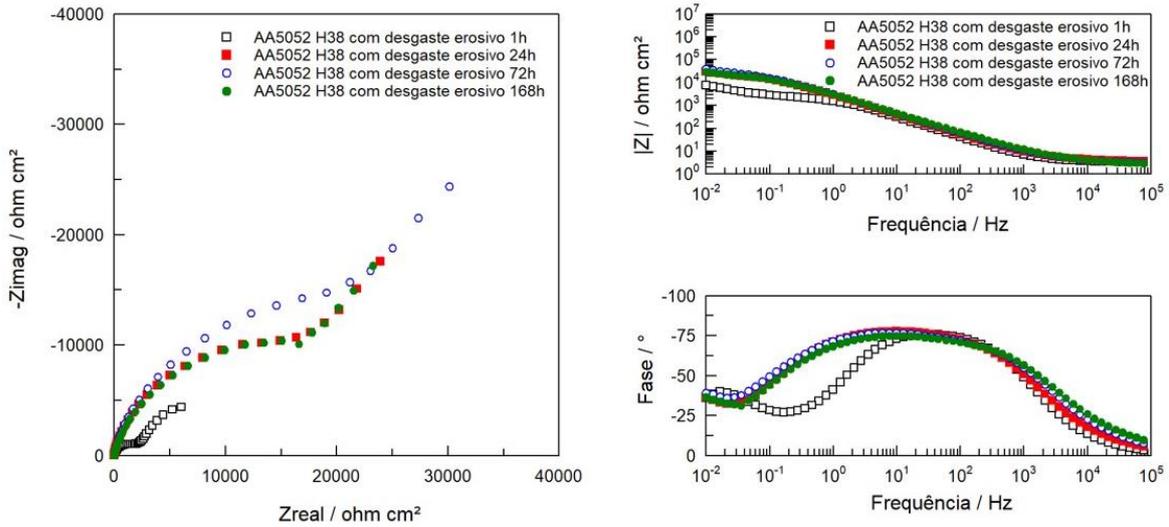


Figura 74 – Espectros de impedância do substrato AA5052 H38 com desgaste erosivo (cp4) após imersão em NaCl 3,5% por 1h, 24h, 72h e 168h.

6.2.3 Comportamento do revestimento de WC-CoCr

A Figura 75 apresenta a evolução do revestimento WC-CoCr ao longo do tempo de imersão na solução salina. Tratando-se de um material passivável, os espectros indicam que a camada de óxidos do revestimento ganha espessura quanto mais tempo exposta à solução NaCl, protegendo mais o material contra o ataque corrosivo. Por outro lado, não é evidente a ocorrência de qualquer processo de corrosão localizada e, em particular, de corrosão por pite.

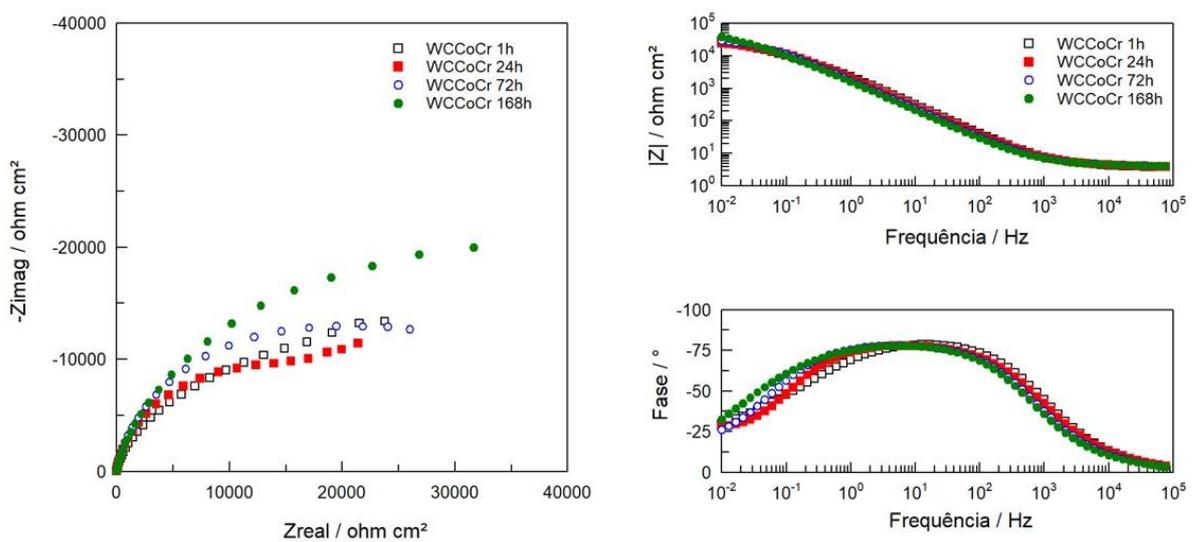


Figura 75 – Espectros de impedância do revestimento WC-CoCr (cp1) após imersão em NaCl 3,5% por 1h, 24h, 72h e 168h.

Os resultados obtidos e, em particular, o fato de não parecer haver uma degradação do comportamento face à corrosão com o tempo, demonstram que o revestimento produzido é de muito boa qualidade. De fato, em estudos realizados com outros revestimentos de WC-CoCr com a mesma composição (96% WC, 10% Co e 4% Cr), foi notado o aparecimento de uma segunda constante de tempo após 10h de imersão em solução salina, indicando que a solução conseguiu penetrar nos poros do material e atingir o substrato (BRIOUA; BELMOKRE; DEBOUT; JACQUOT *et al.*, 2012). Por outro lado, outros autores (ANDREA GARFIAS; VICENTE ALBALADEJO; IRENE GARCIA; SERGI, 2020) e (WANG; ZHANG; CHENG; XIANG *et al.*, 2013) referem que a baixa porosidade é um fator muitíssimo importante, dado permitir evitar a penetração do eletrólito, e que os revestimentos de WC-CoCr obtidos por HVOF, se aplicados correctamente e formando uma estrutura lamelar, conduzem a excelentes resultados.

Na Figura 76 pode observar-se o efeito do desgaste erosivo no comportamento do revestimento WC-CoCr após imersão em NaCl 3,5%.

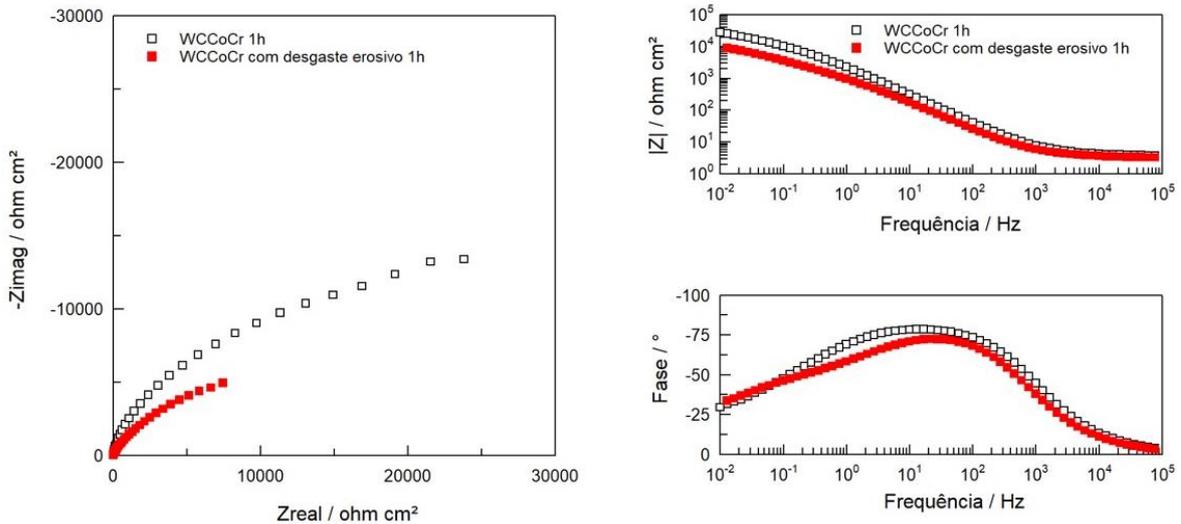


Figura 76 – Espectros de impedância do revestimento WC-CoCr com desgaste erosivo (cp2) e sem desgaste erosivo (cp1) após imersão em NaCl 3,5% por 1h.

É evidente uma redução da impedância do sistema face ao revestimento intacto, que poderá atribuir-se à remoção dos óxidos protetores ocorrida durante o processo de desgaste. Os valores do módulo da impedância às baixas frequências (0,01 Hz), obtidos no diagrama de Bode, diminuem de 27 kΩ cm², para a amostra sem desgaste, até 8,9 kΩ cm², para a amostra

com desgaste erosivo, ao passo que os valores da impedância real descem desde $23 \text{ k}\Omega \text{ cm}^2$, para $7,4 \text{ k}\Omega \text{ cm}^2$, respectivamente.

A evolução com o tempo de imersão da amostra de WC-CoCr com desgaste é apresentada na Figura 77 e traduz-se em uma continuada diminuição da impedância, o que indicia que os óxidos removidos por desgaste não recuperam nas condições de imersão. Assim, uma vez removida a sua camada protetora, o processo de degradação do material não parece ser revertido, antes acelerando com o tempo.

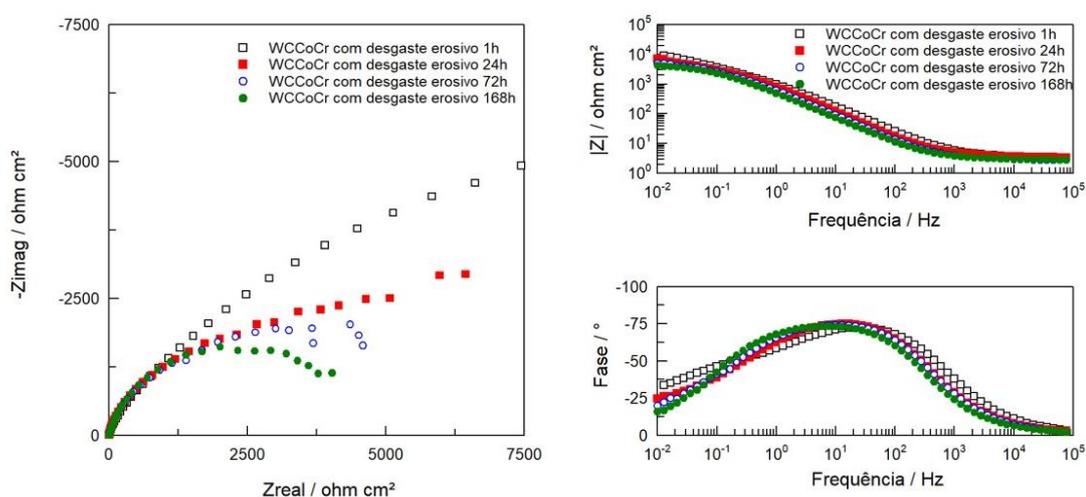


Figura 77 – Espectros de impedância do revestimento WC-CoCr com desgaste erosivo (cp2) após imersão em NaCl 3,5% por 1h, 24h, 72h e 168h.

6.2.4 Substrato AA5052 H38 vs revestimento de WC-CoCr

Analisa-se em seguida os comportamentos dos dois materiais, substrato de AA5052 H38 e revestimento de WC-CoCr. Pretende-se com essas comparações apresentar as semelhanças e as diferenças dos comportamentos desses materiais, com e sem a presença de imperfeições superficiais resultantes do desgaste erosivo.

Em primeiro lugar, apresenta-se na Figura 78 os espectros de ambos os materiais sem desgaste erosivo, após 1h de imersão em solução salina.

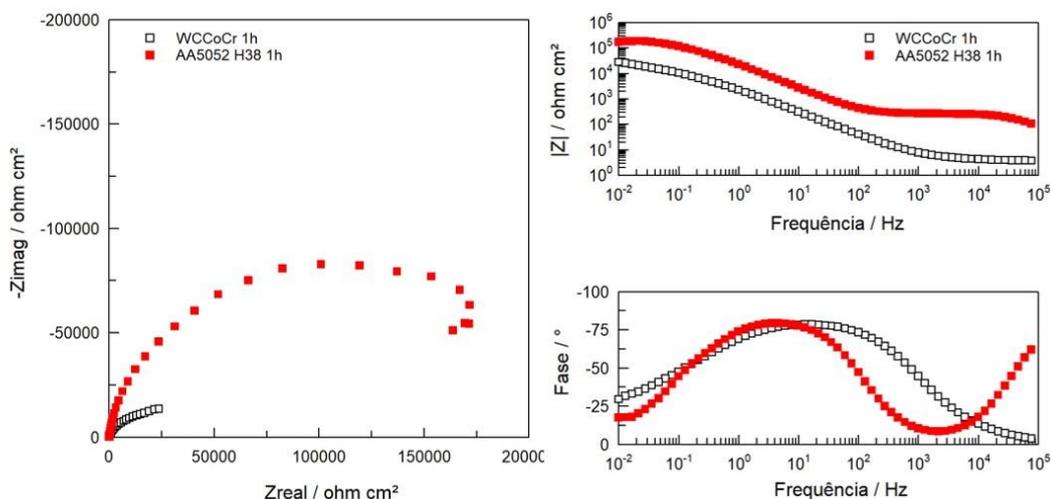


Figura 78 – Espectros de impedância do substrato AA5052 H38 (cp3) e do revestimento WC-CoCr (cp1) após imersão em NaCl 3,5% por 1h.

Da Figura 78 pode, primeiro que tudo, observar-se a diferente natureza das duas superfícies, com respostas em impedância bastante diferentes. Em particular, o substrato apresenta já duas constantes de tempo, uma das quais às altas frequências (que no diagrama de Nyquist corresponde a um pequeno semicírculo com aproximadamente $250 \Omega \text{ cm}^2$ junto à origem, não observável nesta figura), enquanto o revestimento tem um comportamento típico de apenas uma constante de tempo, embora o seu diagrama de Bode – ângulo de fase se apresente um pouco distorcido às baixas frequências. Por outro lado, os valores de impedância são claramente superiores para o substrato, o que pode dever-se à natureza distinta dos óxidos formados neste caso. Desta forma, em uma primeira análise, e baseados apenas no comportamento após 1h de imersão em solução de NaCl, poderíamos inclinar-nos a concluir que o substrato resiste de forma mais eficaz ao ataque corrosivo.

Contudo, observando a Figura 79, obtida após 72h de imersão em solução salina, a análise pode tornar-se diferente. De fato, como referido acima, logo às 24h de imersão já é detectável a ocorrência de corrosão por pite na amostra do substrato. Assim, embora os valores da impedância global sejam ainda mais elevados para o AA5052 H38, a existência de pites constitui um fator de risco agravado, dado o seu caráter localizado, que pode provocar danos consideráveis apesar de concentrados em apenas alguns pontos da superfície.

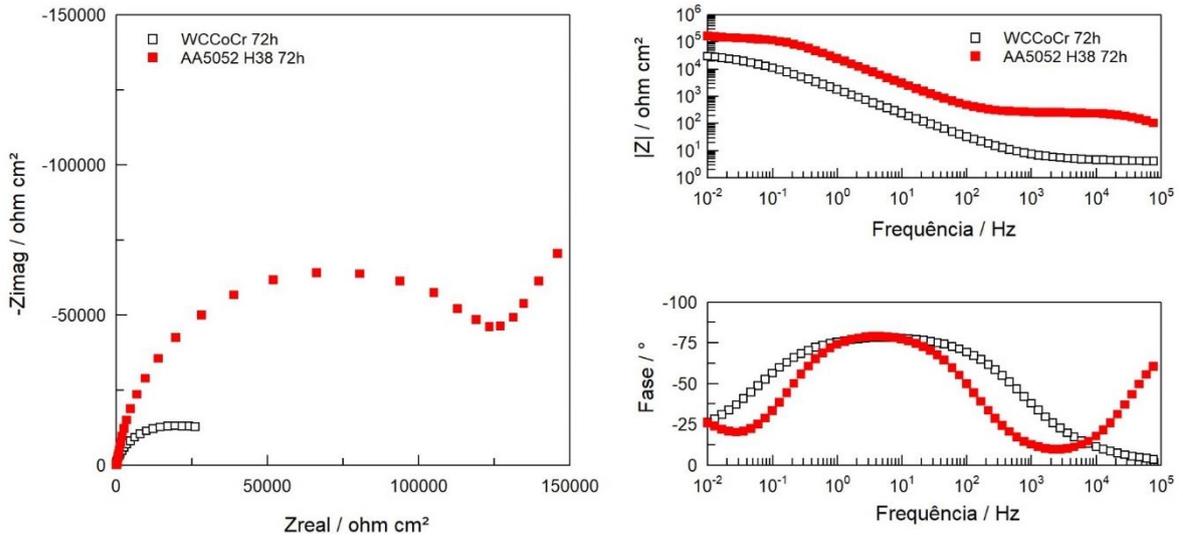


Figura 79 – Espectros de impedância do substrato AA5052 H38 (cp3) e do revestimento WC-CoCr (cp1) após imersão em NaCl 3,5% por 72h.

De qualquer forma, quando comparamos o substrato com o revestimento, é necessário ponderar a sua impedância global, que favoreceria o substrato, com o caráter localizado do ataque corrosivo, que o inferioriza face ao revestimento. Além disso, é de notar que a liga de alumínio 5052 H38 pertence à série 5xxx, normalmente utilizada em aplicações nas quais se exige razoável resistência mecânica e uma excelente resistência à corrosão. Assim, pode-se concluir que se trata de um material projetado para essa finalidade de resistir a ambientes corrosivos.

Na Figura 80 compara-se a liga de alumínio 5052 H38 com o revestimento WC-CoCr, agora ambos com a ação de desgaste por erosão.

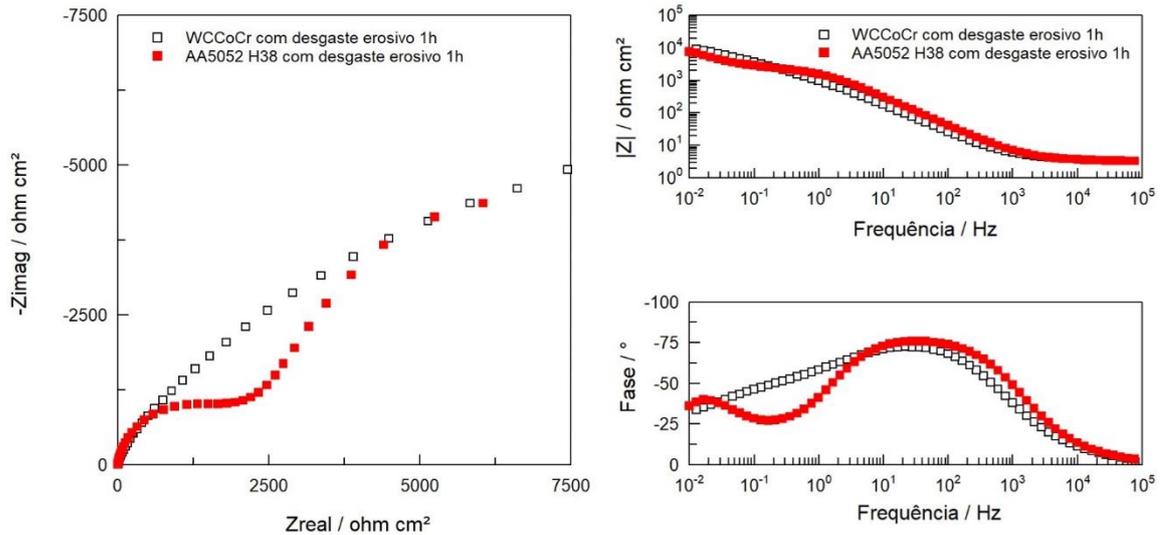


Figura 80 – Espectros de impedância do substrato AA5052 H38 com desgaste erosivo (cp4) e do revestimento WC-CoCr com desgaste erosivo (cp2) após imersão em NaCl 3,5% por 1h.

Comparado com a Figura 79, os valores de impedância agora verificados para o substrato e o revestimento aproximam-se bastante, passando mesmo o substrato a apresentar um módulo da impedância à frequência mínima inferior ao revestimento (7,4 kΩ cm² do substrato contra 8,9 kΩ cm² do revestimento), apesar de esta diferença não ser significativa. Porém, o tipo de corrosão é diferente em cada uma das superfícies.

De fato, e como discutido acima, em particular na análise da Figura 73 (AA 5052 H38) e da Figura 76 (WC-CoCr), a ação do desgaste erosivo traduziu-se em uma diminuição de mais do que uma ordem de grandeza na impedância do substrato, enquanto no revestimento diminuiu apenas de um fator de 3. Por outro lado, a corrosão da liga de alumínio envolve a formação de pite, claramente mostrada pela elevação do ângulo de fase junto ao limite mínimo das frequências, enquanto a do revestimento parece ocorrer de uma forma mais uniforme. Como já foi referido, a corrosão por pite pode conduzir a resultados catastróficos, dada a concentração dos seus efeitos em uma área diminuta, ao contrário da corrosão generalizada, muito menos grave.

Pode dizer-se que em condições de desgaste erosivo o substrato perde a sua aparente superioridade em termos de resistência à corrosão. Pelo contrário, o revestimento de WC-CoCr quase não perdeu sua eficiência em resistir à corrosão quando sua superfície foi afetada por imperfeições físicas devido à ação erosiva realizada em sua superfície.

Finalmente, na Figura 81 compara-se os espectros do revestimento WC-CoCr sem desgaste erosivo com o substrato com desgaste erosivo. O revestimento WC-CoCr possui maior resistência ao desgaste erosivo em comparação ao substrato AA5052 H38. A Figura 81 apresenta os espectros de impedância do substrato AA5052 H38 com desgaste erosivo (cp4) e do revestimento WC-CoCr sem desgaste erosivo (cp1) após imersão em NaCl 3,5% por 1h e 168h respectivamente.

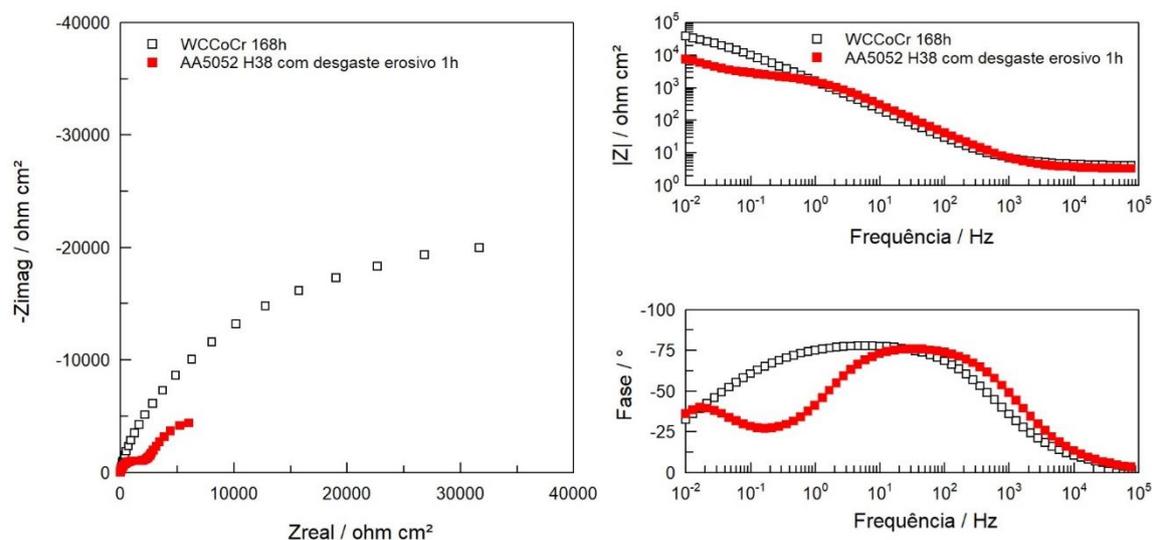


Figura 81 – Espectros de impedância do substrato AA5052 H38 com desgaste erosivo (cp4) e do revestimento WC-CoCr sem desgaste erosivo (cp1) após imersão em NaCl 3,5% por 1h e 168h respectivamente.

A comparação dos espectros de impedância da Figura 81 é suportada na suposição de uma hipótese que possa ocorrer na COP, considerando o desgaste erosivo, onde a superfície WC-CoCr, por resistir mais ao desgaste erosivo, mantém suas propriedades de resistência à corrosão enquanto que o alumínio 5052 H38 não. Tal situação indica a superioridade do revestimento protetor WC-CoCr no que diz respeito a durabilidade e vida útil no ambiente tribológico em questão.

As quatro amostras utilizadas nos ensaios de EIE (WC-CoCr/AA5052 H38 com e sem desgaste) passaram por uma análise de imagens em MEV e com auxílio de uma lupa. Essa análise foi necessária porque as amostras apresentaram aspectos diferentes em suas superfícies após a realização dos ensaios de EIE. As amostras são apresentadas na Figura 82, onde é possível ver o substrato AA5052 H38 com e sem desgaste (Figura 82c e 82d) e o WC-CoCr também com e sem desgaste (Figura 82a e 82b).

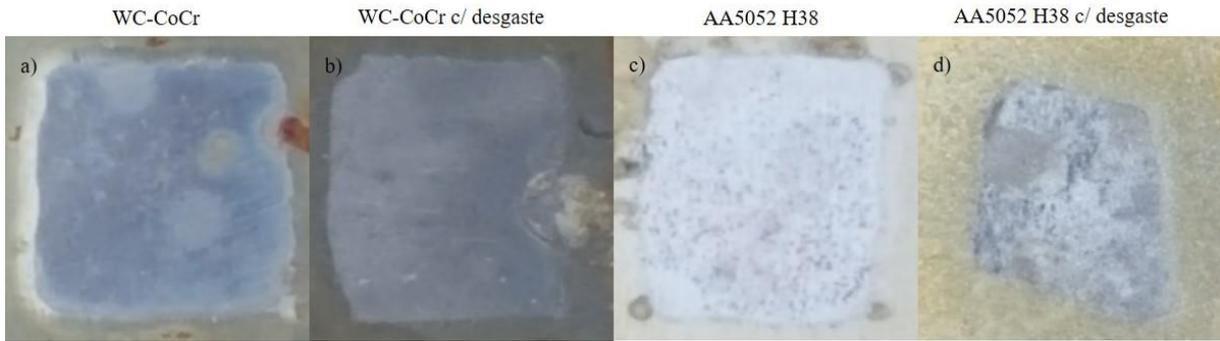


Figura 82 – Corpos-de-prova após suas utilizações nos ensaios de corrosão: WC-CoCr sem desgaste (a), WC-CoCr com desgaste (b), AA5052 H38 sem desgaste (c) e AA5052 H38 com desgaste (d).

Enquanto as superfícies do WC-CoCr com e sem desgaste apresentaram uma tonalidade azulada, como se fosse resultado da presença de uma película superficial, as superfícies do AA5052 H38 com e sem desgaste apresentaram pites por corrosão localizada, sendo que na superfície com desgaste é possível perceber algumas crateras semelhantes ao encontrado nas pás da COP. Percebe-se nas imagens que as superfícies do WC-CoCr com e sem desgaste não apresentaram corrosão severa, mantendo um aspecto semelhante ao original, mesmo após esse longo tempo após o contato com solução NaCl 3,5%. Já as superfícies do AA5052 H38 com e sem desgaste apresentaram um desgaste de suas superfícies bem significativas. Dessa forma, a ideia inicial de que o desgaste erosivo na superfície das pás da COP gera microfissuras que aceleram a corrosão por pite é comprovada. Pode-se concluir que o desgaste erosivo aplicado foi muito mais severo para o material AA5052 H38 do que para o revestimento WC-CoCr. As mesmas amostras das imagens acima para o revestimento protetor WC-CoCr com e sem desgaste e que passaram por ensaios de corrosão (Figura 82a e 82b), são apresentadas em MEV com EDS na Figura 83.

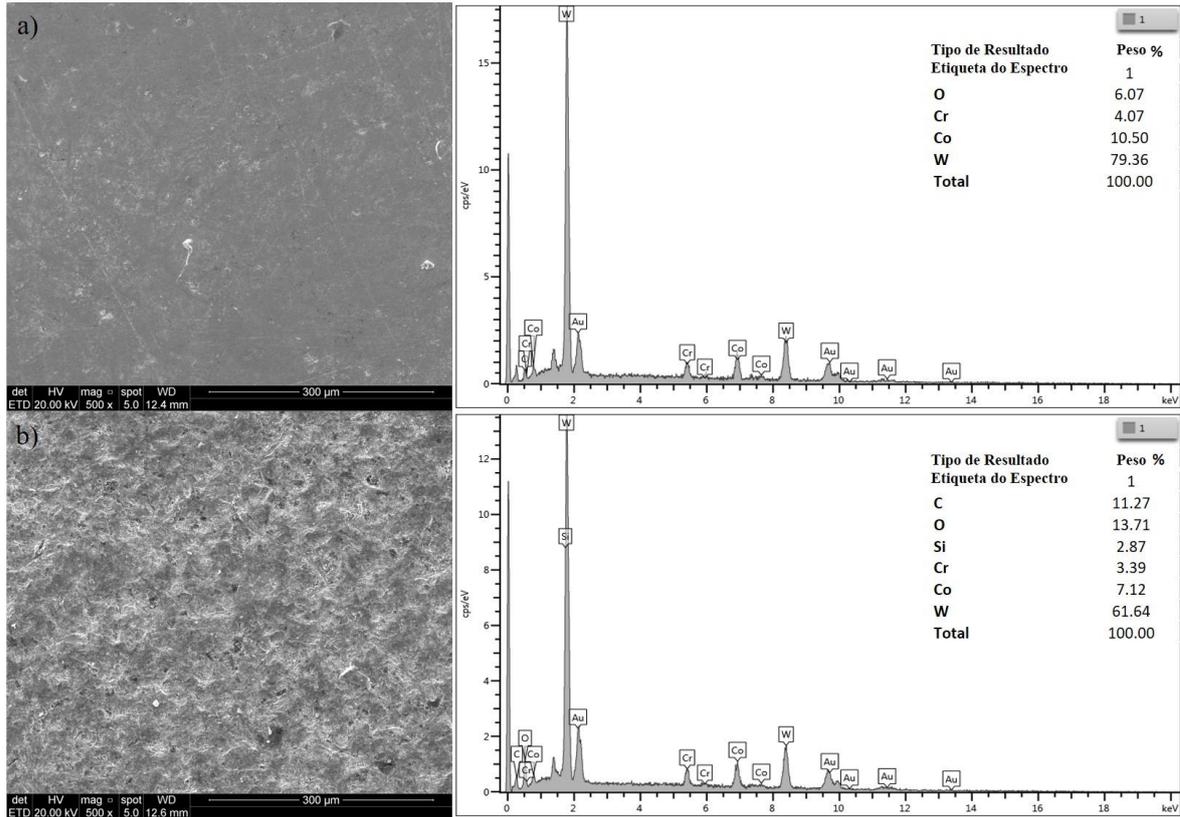


Figura 83 – Micrografia (500x) de corpos-de-prova utilizados nos ensaios de corrosão: WC-CoCr sem desgaste (a) e com desgaste (b), ambas com suas respectivas composições químicas.

Pode-se visualizar na Figura 83 acima que a micrografia do revestimento com desgaste apresenta uma maior rugosidade, bem como maiores zonas escuras (microfissura) em comparação com o revestimento apenas com ataque corrosivo. Já as imagens para o substrato AA5052 H38 com e sem desgaste e que passaram por ensaios de corrosão (Figura 82c e 82d), são apresentadas em MEV com EDS na Figura 84.

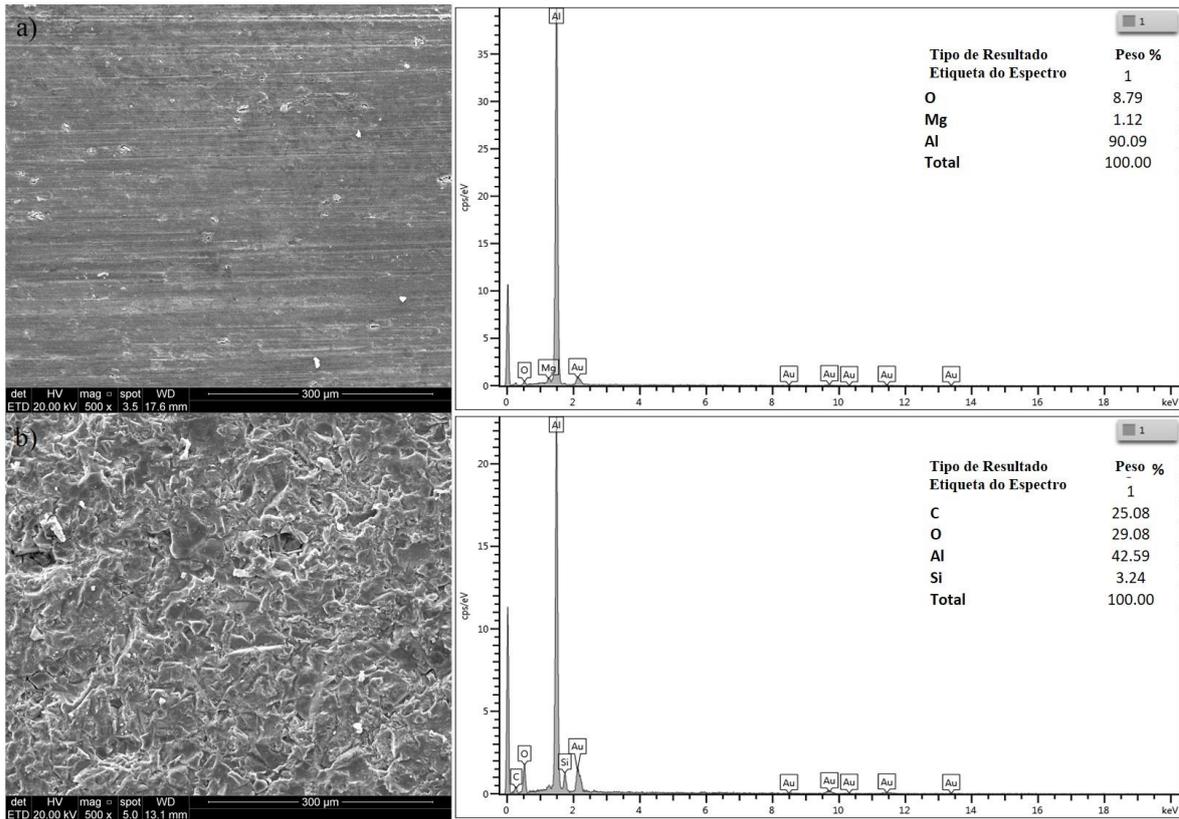


Figura 84 – Micrografia (500x) de corpos-de-prova utilizados nos ensaios de corrosão: AA5052 H38 sem desgaste (a) e com desgaste (b), ambas com suas respectivas composições químicas.

Pode-se visualizar na Figura 84 acima que a micrografia do revestimento com desgaste apresenta uma maior rugosidade em comparação com o revestimento apenas com ataque corrosivo. Outra observação a ser evidenciada é a eliminação do Magnésio na composição química superficial da amostra com desgaste e ataque corrosivo, já que este elemento não deverá estar presente na camada de óxidos formada.

6.3 AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DAS CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS NOS RESULTADOS DOS TESTES DE EROSÃO

6.3.1 Superfícies WC-CoCr e A356.0 T6/AlSi₇Mg_{0,3} sobre efeito de desgaste erosivo somente com solução salina

Os resultados de ensaio de erosão com a utilização de ar comprimido e de solução salina foram plotados em razão da perda de volume do material sobre variações de pressão, de distância e de quantidade de erodente utilizado. A Figura 85 apresenta o resultado do ensaio para cada variação da pressão do ar comprimido, sendo que para cada ponto experimental foi

utilizado 3 L de solução salina. Definiu-se a abreviatura de (S) e (R) para os lados do substrato em alumínio A356.0 T6/AlSi₇Mg_{0,3} e do revestimento WC-CoCr, respectivamente. Esses valores foram obtidos com ensaios a 90° e um espaçamento de 10 mm entre o bico da pistola ou simplesmente bico aspersor e o corpo-de-prova.

Observou-se que o desgaste erosivo aumenta sob efeito de maiores pressões e seus valores de perda de volume concentraram-se nas faixas de $0,2 \times 10^{-4} \text{ cm}^3$ a $1,0 \times 10^{-4} \text{ cm}^3$ para o alumínio A356.0 T6/AlSi₇Mg_{0,3} e de $0,08 \times 10^{-4} \text{ cm}^3$ a $0,3 \times 10^{-4} \text{ cm}^3$ para o revestimento WC-CoCr.

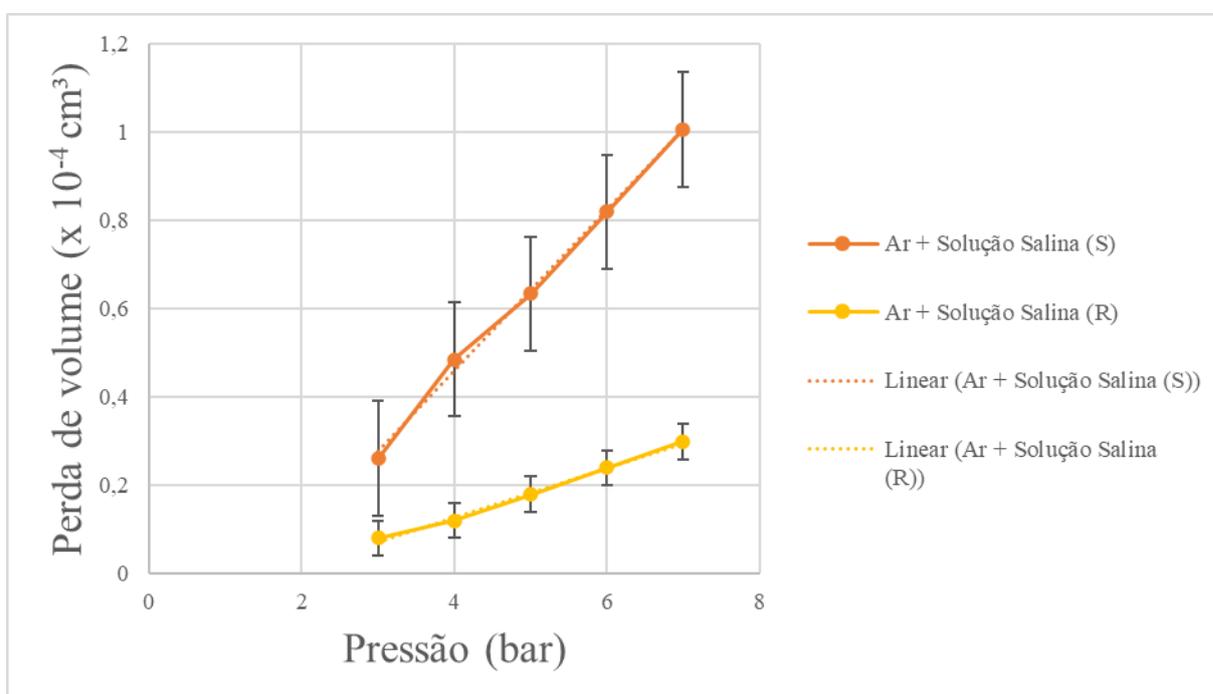


Figura 85 – Efeito da pressão na perda de volume do substrato em alumínio A356.0 T6/AlSi₇Mg_{0,3} e do revestimento WC-CoCr, em condições desgaste erosivo com solução salina e ar comprimido.

Esse ensaio foi repetido, porém com a pressão fixada em 3 bar e com a variação da distância entre o bico da pistola e o corpo-de-prova. Como seria de esperar, os valores de perda de volume decrescem com a distância, desde $0,26 \times 10^{-4} \text{ cm}^3$ ou $0,08 \times 10^{-4} \text{ cm}^3$, respectivamente, para o alumínio A356.0 T6/AlSi₇Mg_{0,3} e para o revestimento WC-CoCr, a uma distância de 10 mm, e tendendo para 0 cm^3 , para maiores distâncias conforme apresentado na Figura 86.

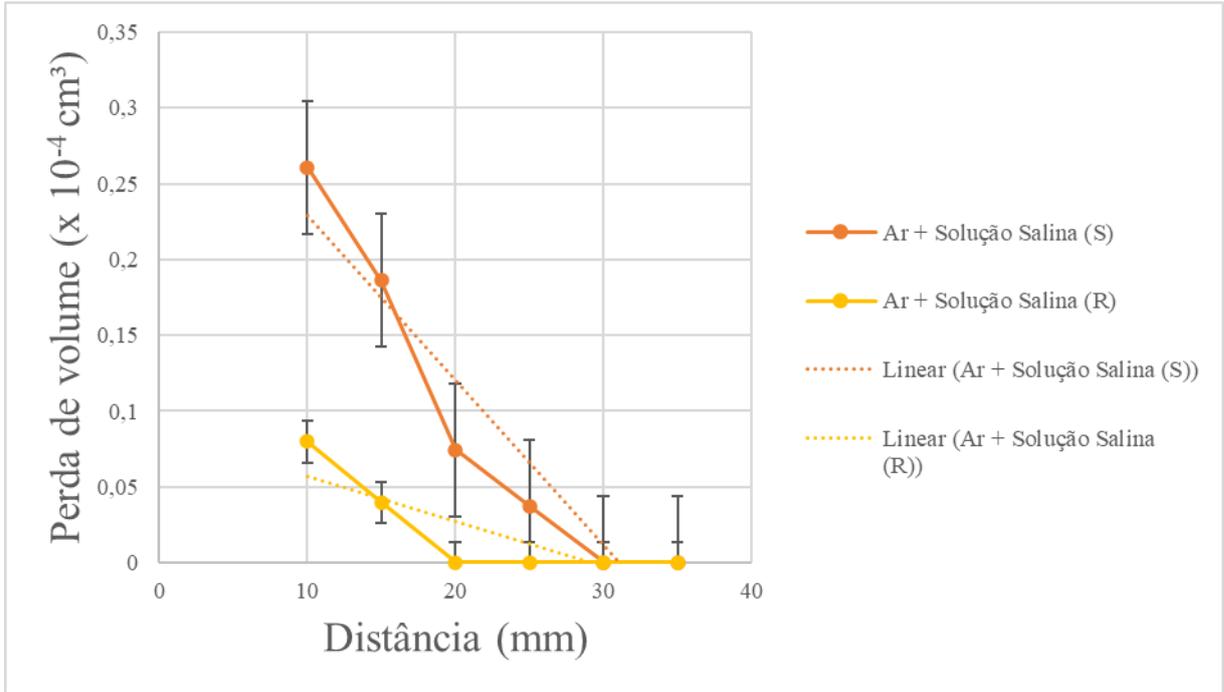


Figura 86 – Efeito da distância entre o bico da pistola e o corpo-de-prova na perda de volume do substrato em alumínio A356.0 T6/AlSi₇Mg_{0,3} e do revestimento WC-CoCr, em condições de desgaste erosivo com solução salina e ar comprimido.

Um novo ensaio foi realizado (Figura 87), agora com a variação de 120s a 720s de tempo de exposição. Assim, estabeleceu-se uma relação de 3 L de solução salina para cada dois minutos de realização de ensaio, possibilitando a construção do gráfico em função da duração do ensaio. A pressão em 3 bar e o espaçamento entre o bico da pistola e o corpo-de-prova de 10 mm foram mantidas. Percebeu-se que o desgaste erosivo aumenta, de uma forma contínua e praticamente linear, com o aumento do tempo de exposição.

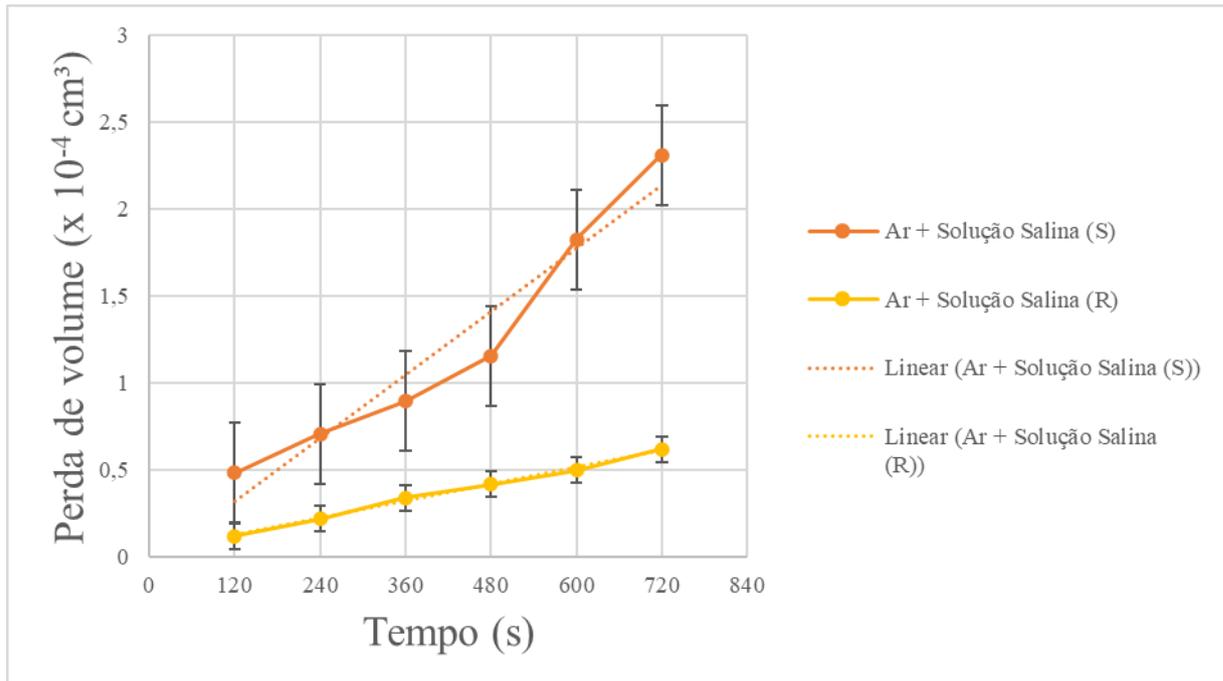


Figura 87 – Efeito da duração do ensaio na perda de volume do substrato em alumínio A356.0 T6/AlSi₇Mg_{0,3} e do revestimento WC-CoCr, em condições de desgaste erosivo com solução salina e ar comprimido.

A utilização de solução salina com o ar comprimido como fluido de trabalho teve o objetivo de simular a ação de gotículas de água do mar que atingem a superfície da pá da turbina da COP em dias de fortes ondulações. Os ensaios realizados em laboratório com variações de pressão de trabalho, tempo de exposição e distância entre o bico da pistola e os corpos-de-prova forneceram dados para uma melhor compreensão do mecanismo de desgaste atuante nesse processo. Foi constatado que o desgaste erosivo ocorre com taxas mínimas, provavelmente pelo fato de o erodente estar em meio líquido, com baixo peso específico, e que ao se chocar com a superfície dos corpos-de-prova se deformam e se espalham. Tais constatações vão de encontro ao balanço energético e características de impacto de gotículas líquidas apresentadas por (ZHANG; JOHANSEN; BERNAD; KIIL, 2015) no capítulo de referencial teórico.

6.3.2 Superfícies WC-CoCr e A356.0 T6/AlSi₇Mg_{0,3} sobre efeito de desgaste erosivo com solução salina e areia calibrada

O acréscimo da areia calibrada como erodente foi utilizada a seco, com o ar comprimido como fluido de trabalho, e também através da combinação com a solução salina.

A Figura 88 apresenta os resultados de perda de volume do substrato em alumínio A356.0 T6/AlSi₇Mg_{0,3} para variações de pressão. Esses valores foram obtidos com ensaios a 90° e um espaçamento de 10 mm entre o bico da pistola e os corpos-de-prova. Foi utilizado 40 g de areia calibrada (a seco) e 40 g de areia calibrada em conjunto com 3 L de solução salina para cada variação da pressão do ar comprimido. Notou-se que a maior perda de volume ocorre com o ensaio realizado a seco, somente areia calibrada e ar comprimido.

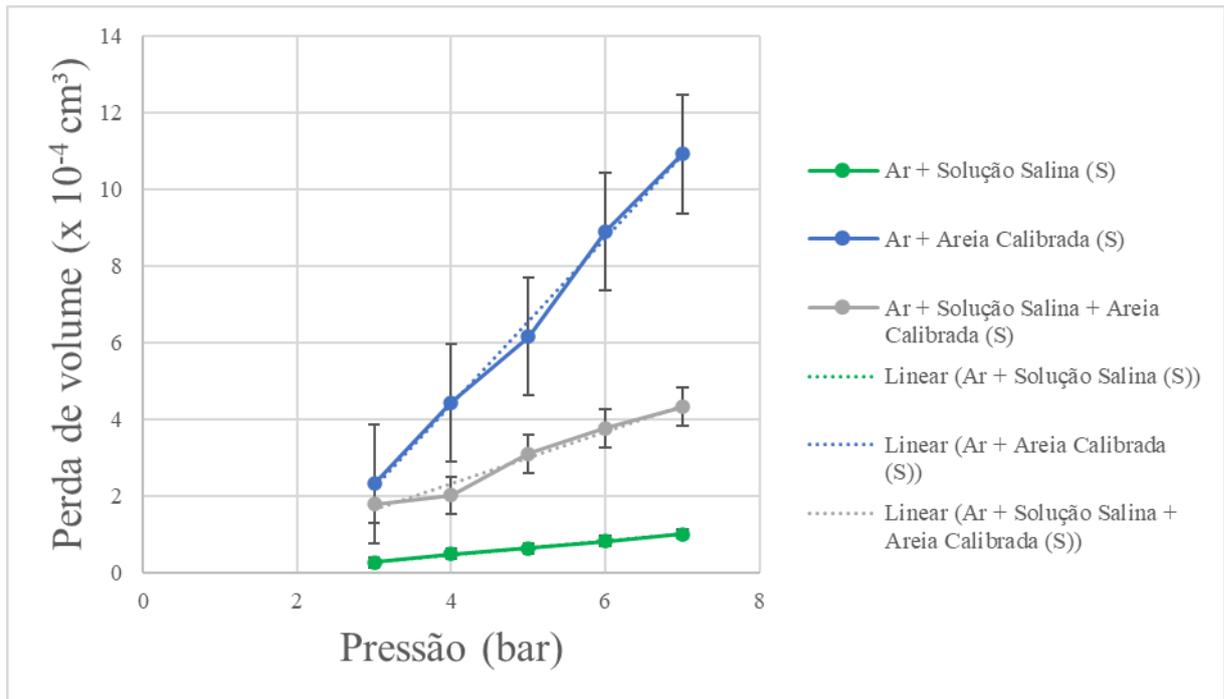


Figura 88 – Efeito da pressão na perda de volume do substrato em alumínio A356.0 T6/AlSi₇Mg_{0,3} em condições de desgaste erosivo com solução salina e ar comprimido (verde), areia calibrada e ar comprimido (azul) e com areia calibrada, solução salina e ar comprimido (cinza).

O ensaio anterior foi repetido sob as mesmas condições para a superfície do material com revestimento protetor WC-CoCr. De acordo com a Figura 89, o maior desgaste continua sendo no ensaio a seco, porém há uma diferença significativa comparado com o desgaste ocorrido na superfície do substrato. Enquanto os valores de perda de volume alcançaram cerca de $11 \times 10^{-4} \text{ cm}^3$ para 7 bar no alumínio A356.0 T6/AlSi₇Mg_{0,3}, para o revestimento WC-CoCr foi de cerca de $4,1 \times 10^{-4} \text{ cm}^3$ para a mesma pressão de trabalho, uma diferença de 2,68 vezes mais desgaste ocorrido sobre a superfície do substrato.

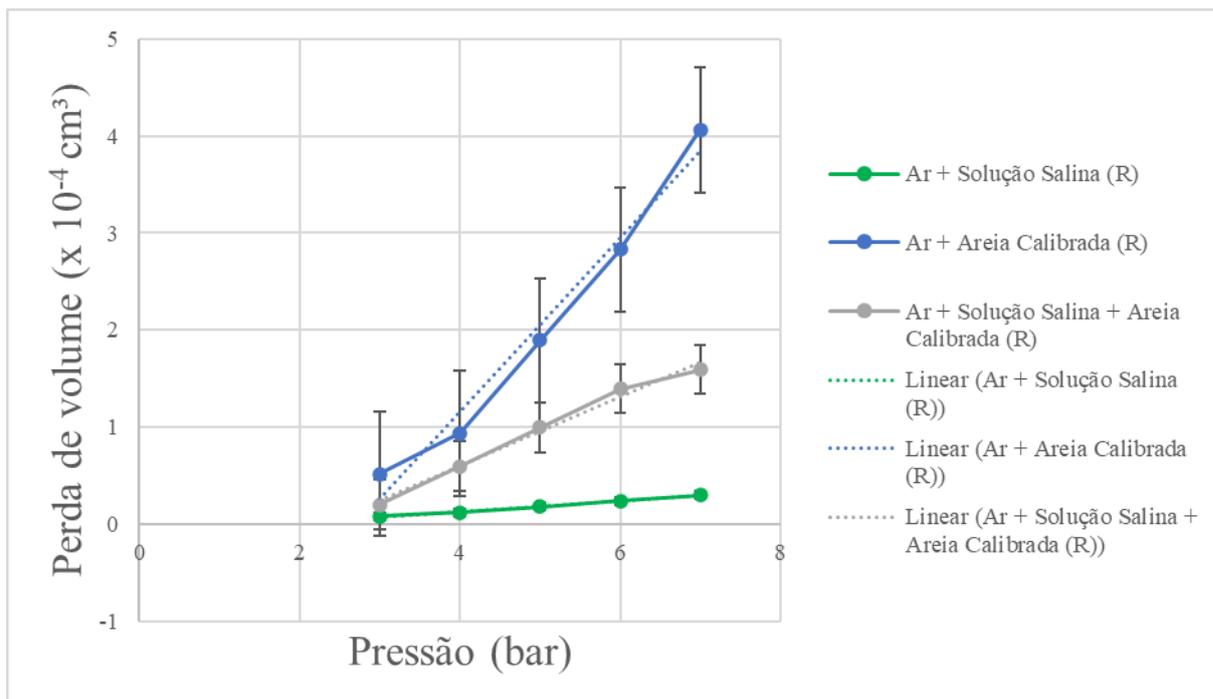


Figura 89 – Efeito da pressão na perda de volume do revestimento WC-CoCr em condições de desgaste erosivo com solução salina e ar comprimido (verde), areia calibrada e ar comprimido (azul) e com areia calibrada, solução salina e ar comprimido (cinza).

Esse mesmo ensaio utilizando os três erodentes juntos também apresenta uma discrepância de valores entre o desgaste ocorrido no substrato e no revestimento, porém com menor intensidade. Isso pode ser explicado pelo fato que o erodente sólido (areia calibrada) em meio líquido forma uma espécie de lama, diminuindo o impacto contra a superfície a semelhança do que ocorre no ensaio somente com solução salina. No entanto, em maiores proporções, já que o peso específico dos dois erodentes se somam formando uma lama mais densa, sendo então capaz de proporcionar um maior impacto erosivo durante o contato com a superfície do material sob ataque.

Dessa forma, é possível identificar três curvas bem definidas de acordo com o tipo de erodente utilizado, cada qual com suas características próprias. Associa-se o maior desgaste ao ensaio erosivo a seco em razão do somatório de fatores favoráveis ao desgaste erosivo em comparação com os demais tipos de ensaios realizados, tais como: aumento de velocidade de impacto em virtude da utilização de componente sólido isolado; aumento de temperatura da superfície de contato devido a um maior atrito e a falta de erodente líquido, por vezes atuando como lubrificante.

Com o entendimento dos efeitos causados pela variação de pressão, avançou-se para a análise da variação da distância entre o bico da pistola e os corpos-de-prova. A Figura 90 apresenta resultados obtidos com a utilização da pressão fixa em 3 bar e o ângulo de ataque a 90°. Para facilitar a compreensão e estudo dos resultados da Figura 90, o ensaio somente com a solução salina foi removido, por possuir valores de desgaste muito inferiores em comparação com a utilização do erodente sólido, tanto a seco como em conjunto com a própria solução salina. Percebeu-se que no ensaio erosivo a seco há uma distância de máximo desgaste, em relação as demais distâncias, tanto para o A356.0 T6/AlSi₇Mg_{0,3} como para o revestimento WC-CoCr.

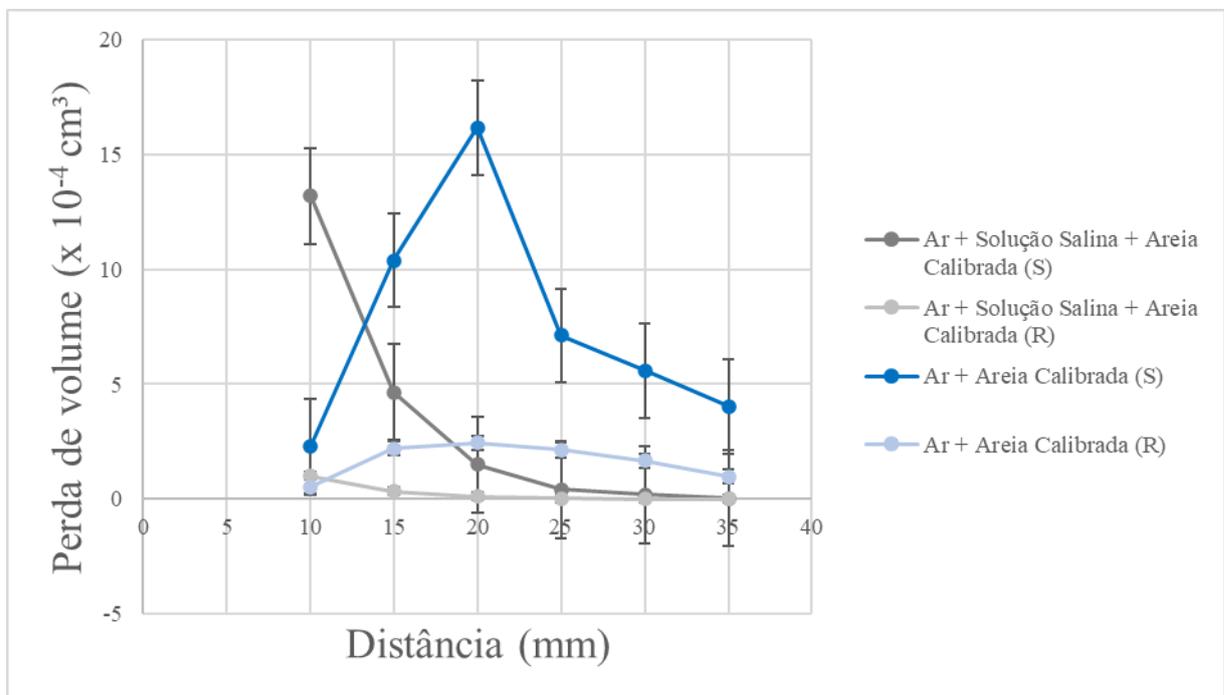


Figura 90 – Efeito da distância entre o bico da pistola e o corpo-de-prova na perda de volume do substrato em alumínio A356.0 T6/AlSi₇Mg_{0,3} e do revestimento WC-CoCr em condições de desgaste erosivo com solução salina, areia calibrada e ar comprimido (tons de cinza) e com areia calibrada e ar comprimido (tons de azul).

Inicialmente, foram analisados os ensaios com os três erodentes em conjunto, tanto para o substrato em alumínio A356.0 T6/AlSi₇Mg_{0,3}, como para o revestimento WC-CoCr. Para ambos, o maior desgaste ocorre na menor distância entre o bico da pistola e os corpos-de-prova, tendendo a zero na medida que o afastamento aumenta. Esse resultado indica que a utilização de um componente líquido como erodente, independente da concentração de sólido

existente, apresenta comportamento bem definido após impacto com a superfície pois a energia cinética do líquido absorve a energia cinética da partícula sólida levando-a de arraste.

Já no ensaio erosivo a seco a 90°, tem-se um mecanismo de atuação que só foi possível de identificação com a variação das distâncias entre o bico aspersor e a superfície do material sob erosão. Este fenômeno é denominado de ricocheteamento, resultante da reação de impacto das partículas incidentes do erodente contra essa superfície. Com avariação da distância entre o bico aspersor e a superfície, foi possível constatar uma distância ótima onde a energia de reação é insuficiente para conter as partículas em direção ao corpo-de-prova. Se essa distância for aumentada, o desgaste volta a decair. Este comportamento é evidenciado com maior resolução na curva do substrato A356.0 T6/AlSi₇Mg_{0,3} do que no revestimento Wc-CoCr onde também ocorre, porém, devido à sua elevada dureza em relação à do substrato de alumínio e à da areia calibrada, seus efeitos são minimizados.

Hipóteses do que de fato ocorre no momento do choque do erodente sólido contra a superfície do material são apresentadas por diversos autores anteriormente referidos na revisão da literatura (HUTCHINGS, 1977) e (ANAND; HOVIS; CONRAD; SCATTERGOOD, 1987). Esses autores concordam que a energia incidente corresponde à energia cinética das partículas erodentes que no momento do impacto parte é absorvida pela superfície do material sob erosão, provocando deformação elástica, deformação plástica, microfissura e aquecimento e parte é transferida como energia cinética para as partículas que são ricocheteadas (sem desconsiderar que as partículas incidentes podem colidir-se durante o voo com partículas ricocheteadas no choque contra a superfície). O dano estaria assim diretamente associado a microfissura do material, em função da sua resistência mecânica e tenacidade à fratura (ANAND; HOVIS; CONRAD; SCATTERGOOD, 1987).

6.3.3 Desgaste erosivo com ângulo de impacto a 90° vs ângulo de impacto 45°

Para verificação da ocorrência do ricocheteamento, foi realizado um ensaio de desgaste erosivo semelhante ao utilizado nas Figuras 91 e 92, porém, somente a seco e utilizando os corpos-de-prova a 45° em relação à superfície. Os resultados mostraram um significativo aumento no desgaste, tanto para a liga de alumínio quanto para o revestimento, conforme a Figura 91. Foi possível também constatar que o desgaste do revestimento sob ataque a 45° foi semelhante ao desgaste da liga de alumínio a 90°, sendo que possuem propriedades de resistência mecânica muito diferentes. Isso evidencia a importância que o

mecanismo de ricocheteamento exerceu durante os ensaios de desgaste erosivo. Assim, para ângulos diferentes de 90°, a energia incidente aportada pelas partículas erodentes seria menos dissipada no choque com outras partículas ricocheteadas pela superfície sob ataque, ocasionando então maior dano ao material por erosão.

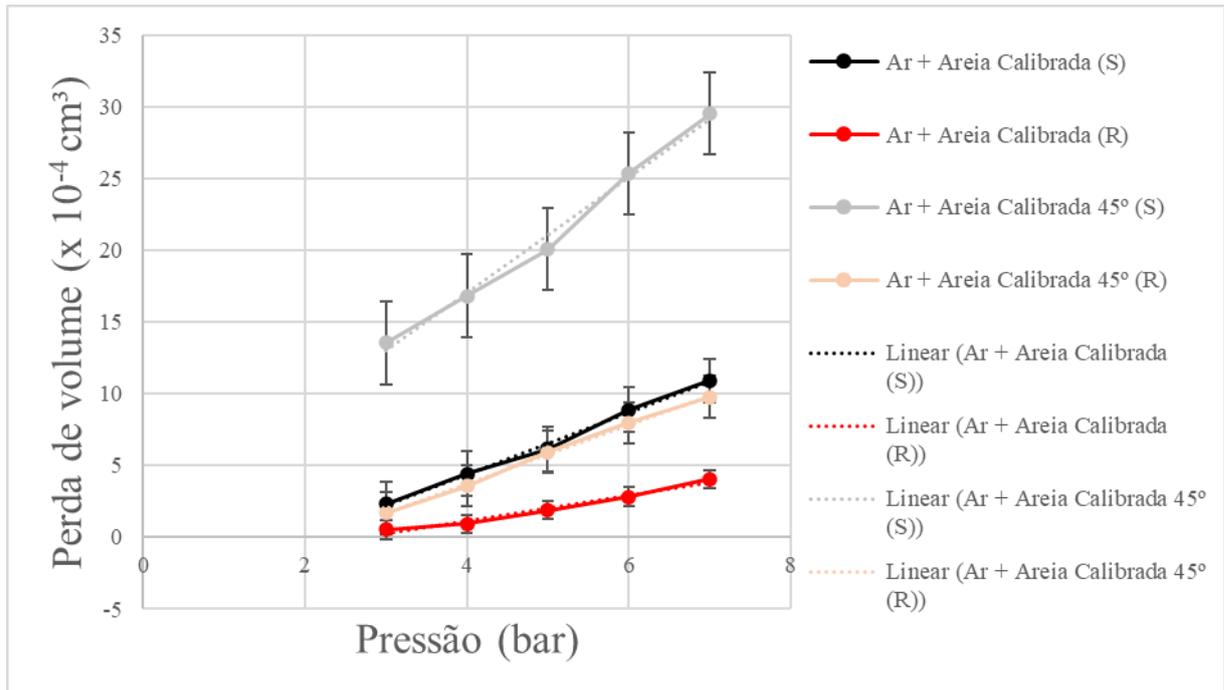


Figura 91 – Desgaste do substrato em alumínio A356.0 T6/AlSi₇Mg_{0,3} e do revestimento WC-CoCr com ângulos de impacto de 90° (cores escuras) e 45° (cores claras) para diferentes pressões em condições de desgaste erosivo com areia calibrada e ar comprimido.

A Figura 92 apresenta resultados de desgaste erosivo em função da distância entre o bico da pistola e os corpos-de-prova, para pressões de 3 bar até 7 bar, do substrato em alumínio A356.0 T6/AlSi₇Mg_{0,3}. Estes resultados evidenciam os mecanismos de desgaste atuantes para várias pressões, distâncias e ângulos de incidência de 45° e 90°. Percebe-se que a 45°, a variação do desgaste em função da pressão tem uma certa linearidade, pois o efeito de ricocheteamento é amenizado pela angulação. Já as curvas com ângulo a 90° apresentam uma distância de máximo desgaste com certo deslocamento a maiores distâncias em função do aumento da pressão de trabalho. O mesmo ocorre para o revestimento protetor WC-CoCr, porém em menor proporção conforme a Figura 93.

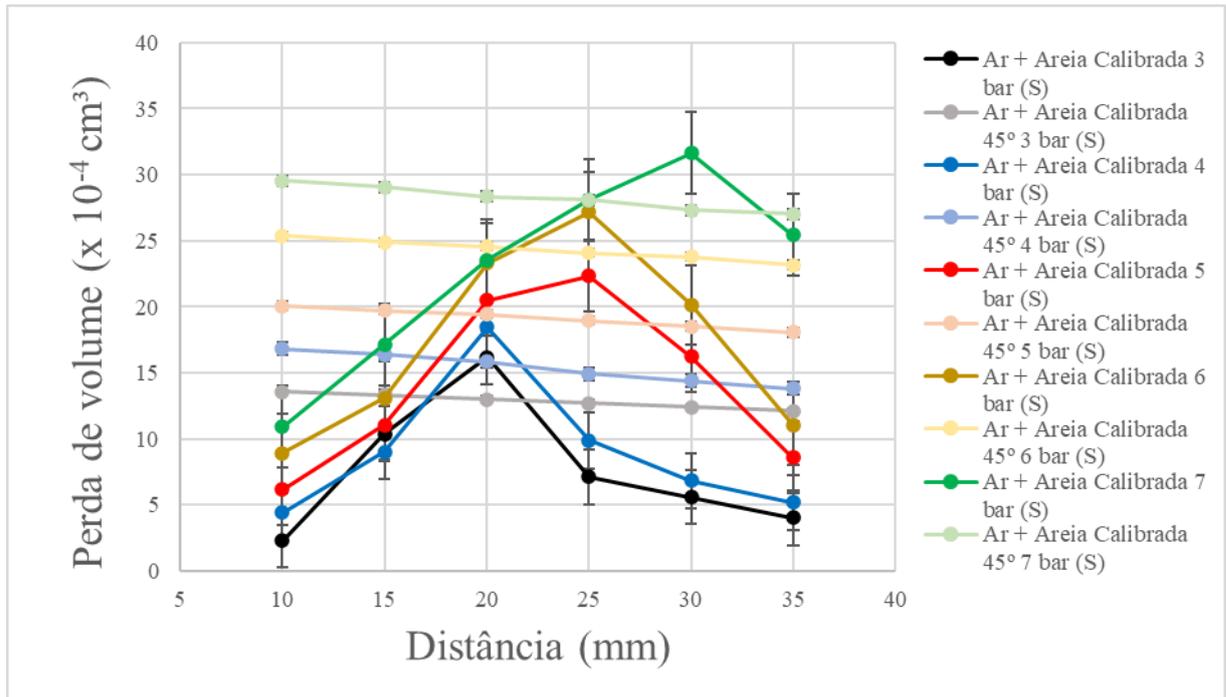


Figura 92 – Desgaste do substrato em alumínio A356.0 T6/AlSi₇Mg_{0,3} com ângulos de impacto de 90° (cores escuras) e 45° (cores claras) para diferentes pressões e distâncias, em condições de desgaste erosivo com areia calibrada e ar comprimido.

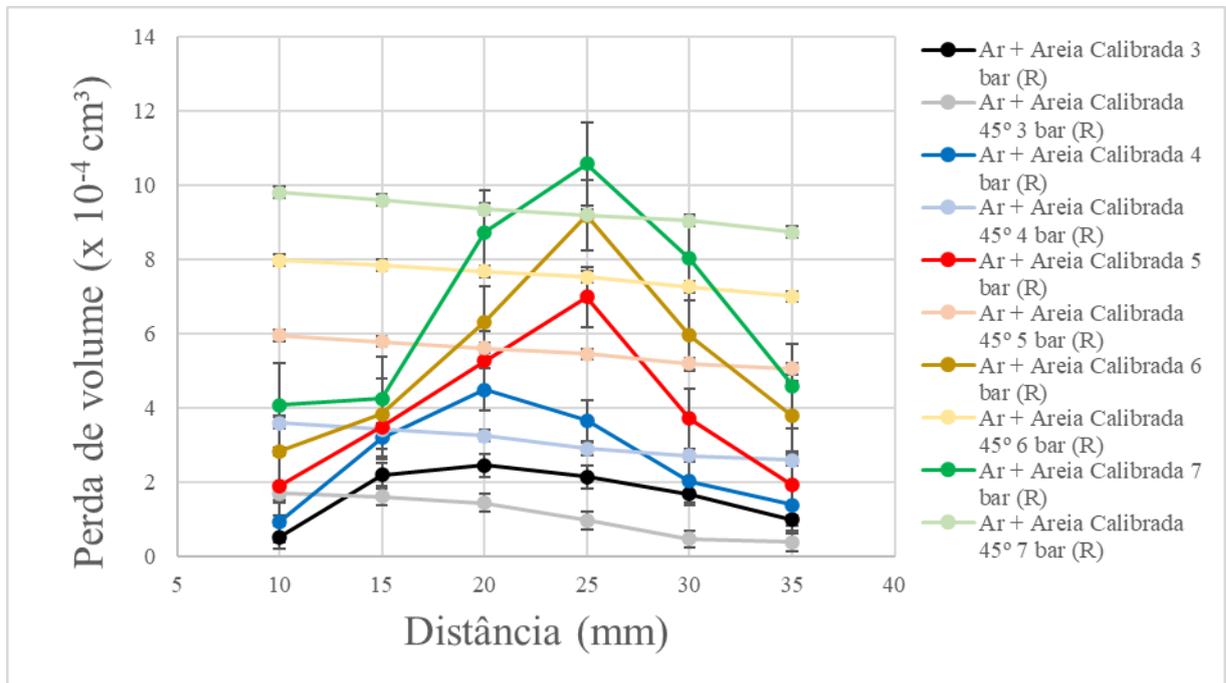


Figura 93 – Desgaste do revestimento WC-CoCr com ângulos de impacto de 90° (cores escuras) e 45° (cores claras) para diferentes pressões e distâncias, em condições de desgaste erosivo com areia calibrada e ar comprimido.

A Figura 94 ilustra a geometria de impacto erosivo da partícula erodente sólida no material alvo a 45° e 90°. Nas Figuras 94 (a, b, c) a 45° é perceptível a perda de intensidade à medida que se afasta o fluxo de partículas erodentes do material alvo. Diferentemente do que ocorre nas Figuras 94 (d, e, f) a 90°, onde o balanço energético entre partícula incidente e partícula ricocheteada é intensificado com a proximidade do fluxo de partículas erodentes do material alvo, tal como foi visto anteriormente por (ANAND; HOVIS; CONRAD; SCATTERGOOD, 1987) quando mantendo o distanciamento constante e aumentando a taxa de fluxo de partículas, percebeu um desgaste erosivo menor à medida que mais erodentes foram utilizados. Na Figura 94 (d, e, f), para distâncias crescentes entre o bico aspersor e a superfície do material alvo, há um momento em que a energia cinética das partículas incidentes será muito superior à energia elástica de ricocheteamento das partículas, fazendo com que maior seja a quantidade de energia no ataque à superfície. No entanto, para distâncias de ataque ainda maiores, os desgastes erosivos voltam a perder intensidade. A barra posicionada dentro da zona de colisão a 90° (Figura 94d) possui a finalidade de representar a divisão de partículas que atingem a superfície do material alvo e que se colidem durante o voo, ou seja, não chegam até o corpo-de-prova. Na distância de ataque ideal (Figura 94e) pouco se percebe de colisões entre as próprias partículas, bem como inexistência (Figura 94f), Dessa forma, fica mais fácil compreender a razão da linearidade de perda de massa nos ensaios erosivos realizados a 45° e de isso não ocorrer nos ensaios realizados a 90°.

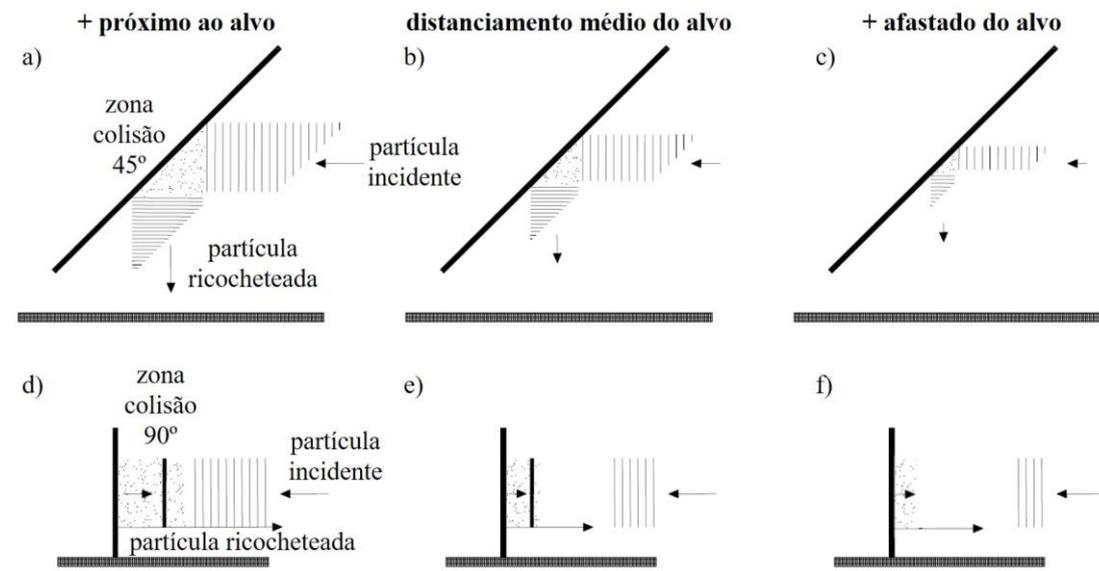


Figura 94 – Esquemas ilustrando as geometrias do impacto da erosão de particulado sólido para ângulos de impacto a 45° e 90° realizados neste estudo. Adaptado de (ANAND; HOVIS; CONRAD; SCATTERGOOD, 1987).

Em ambas as Figuras 92 e 93, nota-se que, apesar de o efeito de ricocheteamento ser amenizado no ensaio erosivo com angulação de 45° , devido à grande parte da quantidade de erodente que deveria atingir a amostra mudar de direção ao colidir com a superfície do corpo-de-prova, não é suficiente para produzir um maior desgaste, mesmo a menores distâncias. Sendo que, para todas as pressões de trabalho utilizadas, o maior desgaste ocorre no ensaio com ângulo de ataque de 90° , por atingir uma maior área do corpo-de-prova. Outro fator importante é o surgimento de um gradiente de distâncias do corpo-de-prova em relação ao diâmetro de atuação do jato erodente, pois por estar inclinado a 45° há uma extremidade a 10mm de distância e sua outra extremidade com distância superior a essa, por exemplo.

A areia coletada dos ensaios erosivos foi analisada por crivagem no equipamento *Analysette 3 Spartan* a fim de se obter a granulometria resultante dos ensaios erosivos. O resultado obtido foi um calibre na faixa de $180\ \mu\text{m}$ a $315\ \mu\text{m}$. Como a areia calibrada utilizada no ensaio erosivo era caracterizada como areia média de acordo com a Norma ABNT NBR 6502/95 de $0,05\ \text{mm}$ a $1\ \text{mm}$, conclui-se que a areia calibrada, pós ensaio de desgaste erosivo, apresentou uma diminuição de calibre, conforme pode ser visto na Figura 95.

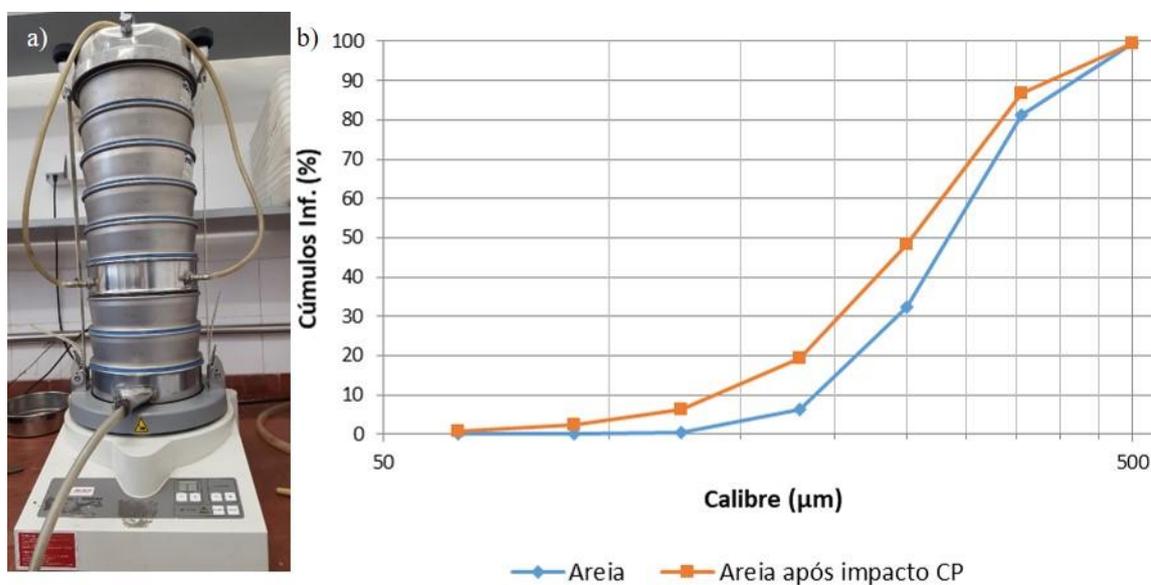


Figura 95 – Equipamento de ensaio de granulometria por crivagem (a) e resultado da análise em forma de gráfico (b).

A Figura 96 apresenta as cicatrizes deixadas nas superfícies dos corpos-de-prova após os ensaios de desgaste erosivo. Nota-se que as cicatrizes resultantes do impacto de gotas de

solução salina são quase imperceptíveis em comparação às cicatrizes deixadas quando a areia calibrada é utilizada. Já as cicatrizes com a utilização de areia calibrada em comparação com as cicatrizes da mistura de areia com solução salina apresentam diferenças significativas de formato. Enquanto o ensaio erosivo com a mistura de erodentes apresenta uma circunferência bem delineada, o ensaio erosivo com a areia calibrada não segue um padrão. Supõe-se que esse efeito é decorrente da capacidade do jato de ar com gotas de solução salina direcionar por arraste o componente sólido (grãos de areia), enquanto o ensaio erosivo a seco, somente com ar comprimido e areia calibrada é muito mais agressivo e turbulento devido aos atritos e ricocheteamentos resultantes da colisão.

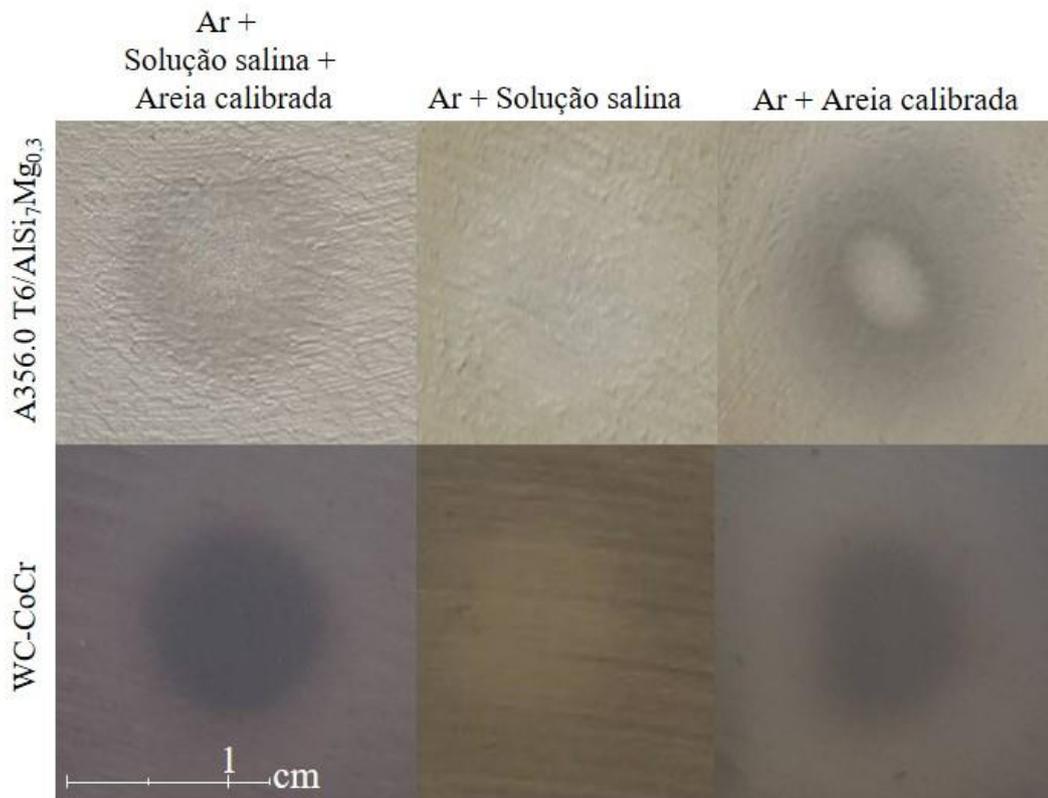


Figura 96 – Cicatrizes resultantes dos ensaios erosivos.

Já a Figura 97 apresenta as cicatrizes resultantes dos ensaios erosivos em MEV com ampliação de 500x, sendo perceptível um maior desgaste ocorrido no substrato A356.0 T6/AlSi₇Mg_{0,3} em relação ao revestimento WC-CoCr. Também é possível perceber (principalmente nas imagens do WC-CoCr) que o desgaste mais acentuado é somente com areia calibrada, seguido da mistura de areia calibrada com solução salina e, por último,

somente com solução salina. Para comprovar tal constatação de forma quantitativa, foi utilizado um microscópio óptico com a finalidade de se obter uma estimativa de profundidade da rugosidade das cicatrizes, sendo que os resultados são apresentados na Tabela 16.

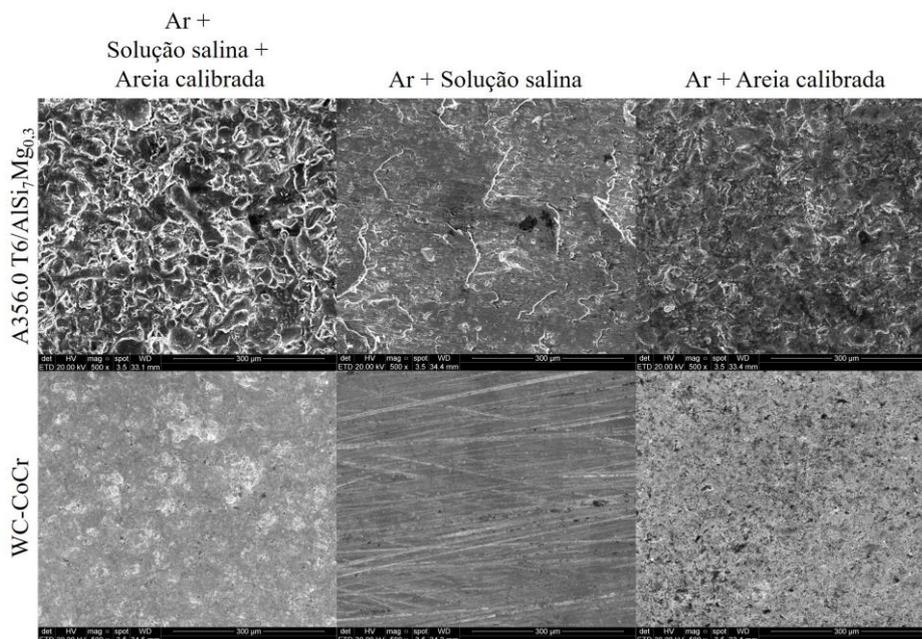


Figura 97 – Micrografia (500x) das cicatrizes resultantes dos ensaios erosivos.

Tabela 16 – Estimativa da profundidade da rugosidade encontrada nas cicatrizes resultantes dos ensaios erosivos.

| Amostras | Estimativa da profundidade da rugosidade (µm) |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| A356.0 T6/AlSi ₇ Mg _{0,3} (Ar + Solução salina + Areia calibrada) | 13 |
| A356.0 T6/AlSi ₇ Mg _{0,3} (Ar + Solução salina) | 6 |
| A356.0 T6/AlSi ₇ Mg _{0,3} (Ar + Areia calibrada) | 18 |
| WC-CoCr (Ar + Solução salina + Areia calibrada) | 5 |
| WC-CoCr (Ar + Solução salina) | 2 |
| WC-CoCr (Ar + Areia calibrada) | 8 |

Ao final da análise dos ensaios erosivos realizados foi possível compreender o grau de participação de cada erodente sobre o desgaste superficial dos corpos-de-prova. Os valores de desgaste nos ensaios erosivos com solução salina mostraram ser cerca de 8 vezes menores do que quando utilizada areia calibrada. Já os valores de desgaste sobre o revestimento WC-CoCr foram cerca de 3 vezes menores do que sobre a liga 5052 H38.

Quanto aos efeitos resultantes das variações da pressão, da distância, do ângulo de impacto e do tempo de realização dos testes de erosão com areia e ar comprimido (com ou sem solução salina), ficou demonstrado que tanto o equipamento desenvolvido nessa pesquisa quanto os métodos de realização dos ensaios são válidos. Os gráficos resultantes de cada teste apresentam uma característica própria.

Ao correlacionar os resultados dos testes de erosão aos eventos tribológicos passíveis de ocorrência sobre as pás da turbina da COP chega-se a conclusão que o material das pás deve possuir propriedades de resistência a erosão, evitando assim a perdas das propriedades de resistência a corrosão. A solução salina intensifica o ataque corrosivo, não sendo suficiente por si só para um desgaste erosivo. Entretanto, o efeito erosivo proporcionado por impacto de particulado sólido é instantâneo pelo desgaste do impacto, mas também acumulativo por acelerar o ataque corrosivo. Dessa forma, em determinados períodos de funcionamento da turbina (principalmente os de maior potencial para geração de energia elétrica), são também os responsáveis por uma degradação intensa e contínua das suas pás. Essa afirmação, também pode ser correlacionada aos dados históricos de funcionamento da COP, pois foi somente após o seu pleno funcionamento que evidenciou-se a degradação das pás da turbina.

Capítulo 7

Conclusões

7 CONCLUSÕES

Este trabalho de pesquisa buscou investigar quais os fenômenos tribológicos envolvidos no processo de desgaste das pás da turbina da Central de Ondas do Pico - COP, uma usina responsável pela transformação da energia contida nas ondas do mar em energia elétrica, cujo princípio de funcionamento é do tipo de coluna de água oscilante, onde o fluido de trabalho que move a turbina do gerador é o ar comprimido/expandido dentro de uma câmara, sob a ação do movimento das ondas.

A energia das ondas é uma fonte renovável para geração de energia elétrica, extremamente energética, mas ainda pouco aproveitada, apesar de possuir uma elevada disponibilidade. Muito desse pouco aproveitamento é em virtude de sua complexa implementação e reduzida competitividade e viabilidade econômica.

O conversor do tipo coluna de água oscilante ou *Oscillating Water Column* – OWC é um dos vários tipos de conversores de energia de onda existentes, sendo o dispositivo de maior sucesso e, até ao momento, o mais extensivamente estudado para extrair energia de ondas do mar. A principal vantagem do OWC em relação à maioria dos demais tipos de conversores de energia das ondas é a sua simplicidade: a única parte móvel do mecanismo de conversão de energia é uma turbina, localizada acima do nível da água, girando a uma velocidade relativamente alta e conectada diretamente a um gerador elétrico convencional.

A COP, que foi construída em 1999, permaneceu com seus componentes expostos ao sistema tribológico durante aproximadamente 160000 horas (cerca de 19 anos), sendo que desse período somente em 6650 horas (4% do total) esteve em plena operação, produzindo energia para a ilha do Pico, nos Açores/PT. Ao todo contabiliza-se uma contribuição energética em torno de 141,2 MWh fornecidos para os habitantes da ilha. Durante o curto período de funcionamento efetivo da COP (2010-2018), a turbina, componente crítico desse sistema, sofreu um desgaste severo que culminou em perdas de eficiência, vibração e elevado ruído. Parte do desgaste é em função da ocorrência de arraste de água do mar e de partículas sólidas contra a superfície das pás da turbina, tanto do lado terra como do lado mar. Diante desse cenário, buscou-se apresentar ao mundo científico os mecanismos de desgaste que atuaram sobre a superfície das pás da turbina da COP e sugerir um revestimento protetor capaz de aumentar a vida útil e a eficiência de sistemas do tipo coluna de água oscilante. Ainda que existam outras estruturas construtivas capazes de operar sobre o mesmo princípio

de funcionamento, destaca-se que a análise realizada neste trabalho supostamente pode ser estendida a unidades de menor/maior potência, em relação à da COP.

Para identificar e simular os possíveis mecanismos de desgaste que atuaram na turbina da COP foram desenvolvidos equipamentos e metodologias próprias (face à escassez de equipamentos e normas) para análise de erosão a seco, em meio líquido e com ambos os erodentes juntos, para correlacioná-los com o comportamento à corrosão. Sobre esses equipamentos (em igualdade de condições de ensaios erosivos/corrosivos) foi possível testar e comparar um revestimento protetor frente ao substrato. Os testes estenderam-se para superfícies lisas e rugosas (após desgaste erosivo) sobre corpos-de-prova em alumínio e em revestimento protetor, para compreender o desempenho dos materiais frente à corrosão quando sua camada de óxido protetora é danificada por desgaste erosivo.

Durante a caracterização do sistema tribológico atuante no funcionamento da COP, foram analisadas e quantificadas as alterações nas variáveis envolvidas, tais como temperatura, pressão, fluxo de ar etc., em função das interações entre a variação das ondulações do mar (subida/descida da onda) e a estrutura de funcionamento existente (lado mar/lado terra – válvulas segurança/alívio). Por outro lado, o *spray* arrasta consigo todos os possíveis contaminantes do ar que aceleram a taxa de corrosão através da ativação da fina camada de eletrólito. A taxa de corrosão dos metais aumenta com o aumento da velocidade do ar que atravessa a turbina. A perda de materiais aumenta a sua aspereza de superfície, que definitivamente irá afetar o desempenho aerodinâmico.

Os materiais das turbinas OWC são normalmente escolhidos para resistir aos efeitos de fadiga sob carregamento cíclico, bem como sobreviver à corrosão do ambiente marinho. Dessa forma, uma boa relação entre resistência a esforços mecânicos/químicos e peso/inércia deve ser encontrada, já que a turbina não pode ter grandes dificuldades para dar início ao seu movimento e deve manter-se em movimento entre duas ondas. Um material que cumpra esses requisitos e que, adicionalmente, seja capaz de impedir a erosão e depósitos de sais nas pás da turbina, poderá reduzir os custos de manutenção e aumentar sua longevidade.

As medições de EIE na COP sobre a pá da turbina necessitaram de adaptações para que fosse possível a realização de tal ensaio, como por exemplo: a utilização de cera e moldura para fixação da curva 90° e delimitação da área de Ø2,5 cm de superfície exposta; a coleta da própria água do mar e seu preenchimento na curva 90°; tampa com furação específica para os elétrodos de referência e auxiliar e medições realizadas em superfície mais

limpa e com crateras. A análise dos espectros de impedância dessas duas zonas evidenciou características similares (corrosão por pite), mas permitiu detectar um ataque corrosivo mais intenso na zona com mais crateras.

Na análise de rugosidade superficial realizada sobre esse material, as fissuras existentes sobre a superfície da pá da turbina instalada na COP chegaram a ultrapassar, inclusive, a escala de medição do equipamento utilizado, com valores de rugosidade média (Ra) de 5,102 μm para a superfície da pá com crateras, e de 1,38 μm para a superfície mais limpa da pá. Ambos os valores de Ra são considerados elevados ao serem comparados com o valor de 0,612 μm mensurado sobre uma pá de reserva da turbina da COP de propriedade do IST, evidenciando assim o elevado desgaste superficial ocorrido nas pás da turbina da COP.

A partir da remoção de uma pequena amostra de uma das pás da turbina da COP e posterior realização de ensaios de EDS, DRX, metalografia e microdureza, identificou-se que o material de fabricação da turbina da COP é a liga de alumínio 5052 H38 (Al-Mg, com baixo teor em Mg). Até esse momento, pelas informações fornecidas pela fabricante, acreditava-se que havia 95% de chance de ser a liga A356.0 T6/AlSi₇Mg_{0,3} devido às dimensões mais avantajadas da turbina ($\varnothing = 2,3\text{m}$) que fizeram prever que o uso de rotores de alumínio fundido fosse quase obrigatório, pois havia a necessidade de conciliar a resistência mecânica, em níveis aceitáveis para o serviço, e ótima resistência à corrosão. Devido a descoberta tardia do efetivo material das pás, o alumínio A356.0 T6/AlSi₇Mg_{0,3} foi utilizado como substrato para deposição do revestimento protetor proposto, bem como para ensaios puramente erosivos.

O alumínio e algumas das suas ligas apresentam taxas de corrosão menores que as apresentadas por outros materiais, porque sofrem passivação quando são expostos à atmosfera ou outros meios oxidantes. A corrosão por pite pode ser iniciada por um pequeno defeito de superfície, como uma rugosidade ou uma alteração local na composição, ou um dano à camada protetora.

A liga de alumínio 5052 H38 tem elevada resistência à corrosão, além de possuir capacidade de criação/regeneração de uma fina camada de passivação de sua superfície, o que a torna uma das melhores ligas de alumínio para a atmosfera marítima. Apesar dessas propriedades, zonas fortemente atacadas por corrosão por pite foram identificadas nas superfícies das pás da turbina da COP. Evidências de imagens/vídeos do funcionamento da turbina da COP em períodos históricos diferentes e o estudo/compreensão dos esforços a que

a turbina esteve sujeita comprovaram um desgaste acelerado nos últimos anos. A comparação dos materiais da turbina e do seu estator, sujeitos aos mesmos mecanismos de desgaste, porém com cicatrizes completamente diferentes, indicam a necessidade de uma boa resistência à erosão para a turbina.

A erosão, por menor que seja, tem energia suficiente para danificar a camada de óxido e expor o material a uma ação corrosiva mais intensa. Os ensaios de EIE, em amostras de alumínio com e sem desgaste superficial, evidenciaram que as elevadas propriedades de resistência à corrosão da liga de alumínio 5052 H38 são perdidas quando sua superfície sofre um continuado desgaste erosivo. O ambiente marítimo, altamente corrosivo, aliado a ações de desgaste erosivo promovem microfissuras que servem como alojamento de sais e assim aceleram o processo de corrosão por pites.

Considerando tais aspectos, propôs-se a aplicação, através da técnica de aspersão térmica HVOF, de um revestimento, um cermet WC-CoCr: cerâmico de fase dura (WC) disperso em uma matriz metálica CoCr como aglutinante mais macio (1350V 86% WC 10% Co e 4% Cr) sobre o alumínio, devido a sua elevada dureza (1200 a 1350 HV) e boas propriedades de resistência à corrosão (resistência à névoa salina de mais de 4000 horas). Optou-se por essa técnica HVOF porque a densidade e a dureza de revestimentos produzidos dessa maneira são tipicamente superiores a outros processos de aspersão térmica. O WC-CoCr também possui uma baixa porosidade (menor que 1%) e uma forte adesão ao substrato (mais de 10000 PSI), ambas características importantes para resistência à fadiga superficial de contato, erosão e corrosão.

Em um primeiro momento, os corpos-de-prova em alumínio 5052 H38 e com revestimento WC-CoCr passaram por um ensaio de erosão através de um jato *spray* (fluxo de ar) com partículas sólidas e líquidas de forma simultânea. Tais ensaios tiveram o objetivo de, sobre mesmas condições de realização de teste, causar desgaste às superfícies dos corpos-de-prova, resultando em quatro diferentes superfícies que foram elas: AA5052 H38 com e sem desgaste e WC-CoCr com e sem desgaste.

A análise dos espectros de impedância dos corpos-de-prova em alumínio 5052 H38 após imersão em NaCl 3,5% por 1h, 24h, 72h e 168h sem desgaste revelou estado passivo após 1h de imersão e iniciação de corrosão por pite ao fim de 24h de imersão (correspondendo ao surgimento de uma nova constante de tempo e elevação do ângulo de fase às baixas frequências). Porém, no corpo de prova com desgaste já é perceptível a iniciação de

corrosão por pite ao fim de 1h de imersão. Entretanto, surge uma maior impedância após exposição continuada à solução salina, pois parece permitir uma regeneração do óxido (reconstruído naturalmente, porém não retorna à espessura inicial).

Já os resultados obtidos para o revestimento protetor WC-CoCr após imersão em NaCl 3,5% por 1h, 24h, 72h e 168h sem desgaste demonstraram que o óxido ganha espessura ao longo do tempo de exposição à solução salina e não parece haver ocorrência de corrosão localizada. Porém, não ocorre regeneração do óxido quando a superfície do revestimento protetor já possui desgaste superficial.

Concluiu-se que, embora o alumínio 5052 H38 seja geralmente considerado um material excelente em termos de resistência à corrosão em ambientes marinhos, ele inicia corrosão por pite nas primeiras 24h de imersão, embora esta seja relativamente moderada. Porém, na presença de erosão, passa a corroer-se logo a partir do início da sua imersão em meio agressivo. Já o revestimento WC-CoCr não apresenta corrosão por pite (mas uniforme) e não sofre deterioração considerável frente ao desgaste.

A micrografia das amostras dos ensaios de EIE, após os ensaios corrosivos, reforçam as conclusões ora descritas, já que as superfícies com revestimento WC-CoCr estavam aparentemente intactas, enquanto as superfícies das amostras da liga de alumínio A5052 H38 sem revestimento apresentaram corrosão por pite e as com desgaste erosivo uma elevada rugosidade. Isso fica evidente nas micrografias com análise química apresentadas neste estudo (Figuras 82 e 83).

Os ensaios erosivos tiveram o intuito de analisar, em escala de laboratório, que fenômenos ocorrem quando as solicitações de erosão-corrosão atuam nas pás de turbinas OWC. Os corpos-de-prova utilizados foram A356.0 T6/AlSi₇Mg_{0,3} e WC-CoCr para ensaios com jato *spray* (fluxo de ar) com partículas sólidas, com água salina e com uma mistura de ambas. O desgaste foi mensurado por perda de volume, pois por se tratar de superfícies de materiais diferentes, suas densidades também eram diferentes (A356.0 T6/AlSi₇Mg_{0,3}: 2,685 g/cm³ e WC-CoCr: 5,02 g/cm³).

Para resistir ao desgaste erosivo, a dureza é uma das propriedades essenciais, tanto das partículas erodentes como da superfície alvo, pois a relação entre elas caracteriza grande parte da quantidade de desgaste obtido. Após a realização dos ensaios erosivos percebeu-se, em sintonia com a revisão da literatura, que as consequências de um jato erodente sólido são completamente diferentes das de um jato erodente de solução salina, ou seja, os fenômenos

decorrentes do impacto são distintos, sendo que a mistura de particulado sólido e solução salina mantém algumas características mais fortes de cada tipo de ensaio e outras se perdem. Um exemplo é o efeito de ricocheteamento que ocorre no impacto de particulado sólido, mas que não ocorre com jato erodente de solução salina (espalhamento) e que também não ocorre em jato erodente com particulado sólido em conjunto com solução salina, já que a característica de espalhamento pós impacto do erodente líquido, ou nesse caso, líquido mais denso, é predominante.

Os resultados mostraram que há diferenças de resultados de desgaste em função do tipo de erodente atuante sobre a superfície dos corpos-de-prova, bem como uma maior capacidade de resistir à erosão do revestimento WC-CoCr. O jato *spray* (fluxo de ar) com água salina foi responsável pela simulação da ação de gotículas de água do mar que atingem a superfície da pá da turbina da COP em dias de fortes ondulações. A utilização de ar com solução salina (superfícies WC-CoCr e A356.0 T6/AlSi₇Mg_{0,3} sob efeito de desgaste erosivo somente com solução salina) mostrou-se completamente dependente da velocidade de impacto com que as gotas atingem a superfície do material alvo. O balanço energético do impacto da solução salina sobre a superfície do corpo-de-prova é diretamente proporcional à intensidade do impacto, acrescidos do desgaste por ondas Rayleigh, resultantes da força centrífuga devida às elevadas rotações da turbina da COP.

Já com a utilização do particulado sólido (areia calibrada) outras variáveis ganharam importância maior, tais como dureza (tanto do material desgastado como do erodente), quantidade de erodente utilizada, granulometria e ângulo de impacto. O balanço energético do impacto do particulado sólido seguiu outro comportamento, com maior atrito, calor e ricocheteamento proporcional ao seu ângulo de impacto. Essa diferença foi observada após variações de distância entre o bico da pistola e as superfícies do corpo-de-prova, tendo sido observada uma distância de máximo desgaste com certo deslocamento a maiores distâncias em função do aumento da pressão de trabalho.

Conclui-se que os maiores desgastes erosivos ocorrem com a utilização somente de particulado sólido, seguido pelo uso de particulado sólido em conjunto com a solução salina, ficando os desgastes mínimos encontrados quando foi utilizado somente a solução salina. Já o maior desgaste erosivo encontrado nos ensaios ocorreu com a utilização de areia calibrada para ensaios a 90° em relação a superfície do corpo-de-prova. Isso deve-se ao fato de que nesse ângulo de ataque um número maior de erodentes consegue atingir uma área maior e com energia suficiente para resultar em um desgaste superficial. Para que o maior desgaste

erosivo pudesse ocorrer com ângulo de impacto a 45°, uma maior proximidade entre o bico da pistola e o alvo teve que ser alcançada. A análise granulométrica da areia calibrada após ensaios erosivos apresentou valores inferiores ao original, resultante das quebras de seus grãos no contato com a superfície dos corpos-de-prova e entre o impacto entre seus próprios grãos devido ao ricocheteamento.

A partir da análise desses resultados de erosão sobre superfícies diferentes, com variações de pressões, de distâncias e ângulos de impacto (90° e 45°), caracterizaram-se as geometrias de impacto e com isso obteve-se o entendimento dos mecanismos de desgaste e do sistema tribológico atuante nesse processo de geração de energia elétrica pela COP, que consiste na existência de desgaste erosivo como fenômeno acelerador do desgaste corrosivo (microfissuras que servem como alojamento de sais). A elevada rotação das pás da turbina da COP e as pressões de trabalho alcançadas em dias de grandes ondulações, seja com arraste de gotículas de água do mar e até mesmo com particulado sólido, obrigam a que o material da pá da turbina tenha propriedades superiores para que sua degradação seja minimizada.

As análises de corrosão sobre materiais AA5052 H38 e WC-CoCr com e sem desgaste mecânico indicaram que a colisão, principalmente do particulado sólido, rompe a fina camada de óxido, causando uma microfissura que promove um caminho de aceleração do desgaste químico por corrosão por pite, cujo fenômeno resulta em um sinergismo, onde a erosão-corrosão oferece taxas de degradação superiores as de ações desses mesmos mecanismos atuando isoladamente. A Tabela 17 ilustra um resumo comparativo entre o material utilizado na fabricação da turbina da COP e o revestimento WC-CoCr proposto para aumento da vida útil e da eficiência de turbinas para conversores de energia das ondas do tipo coluna de água oscilante.

Tabela 17 – Resumo comparativo de desempenho ao sistema tribológico da COP do material da turbina AA5052 H38 vs revestimento protetor WC-CoCr.

| Considerações | | AA5052 H38 | WC-CoCr |
|----------------------------|-----------------------|-----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| Após os ensaios EIE | | Corrosão por pite e elevada rugosidade nas com desgaste erosivo | Aparentemente intactas |
| Erosão (0,1bar* – 3bar) | ar com solução salina | Desgaste mínimo | Desgaste imperceptível |
| | particulado sólido | Menor capacidade de resistência à erosão | Maior capacidade de resistência à erosão |
| Corrosão | Sem desgaste | Ótima resistência à corrosão | Boa resistência à corrosão |
| | Com desgaste | Perda significativa de resistência à corrosão | Perda insignificante de resistência à corrosão |

*valor máximo de pressão da COP em relação a pressão mínima utilizada nos ensaios erosivos

Em relação ao sinergismo de desgaste erosivo e corrosivo associados à operação da COP é possível indicarmos que, após todas as informações e resultados analisados, no lado terra da turbina (zona de maior desgaste) há hipótese de o sinergismo ser mais erosivo do que corrosivo. Entretanto, no lado mar (zona de menor desgaste) ocorreu o contrário, sendo a corrosão mais intensa do que o desgaste erosivo.

Apesar dos diversos obstáculos que tiveram de ser superados no decorrer desta investigação, tais como a incerteza do material utilizado na fabricação da turbina da COP, a dificuldade de acesso à COP e à sua turbina, bem como a escassez de normas e de equipamentos de desgaste erosivo capazes de atuar com três tipos de erodentes simultaneamente (ar, solução salina e particulados sólidos), ainda assim foi possível obter o entendimento do sistema tribológico e dos mecanismos de desgaste atuantes em turbinas dos OWCs utilizados para a geração de energia elétrica proveniente das ondas do mar.

O uso da técnica de aspersão térmica por HVOF para aplicação de um revestimento protetor com elevada densidade e dureza (WC-CoCr) sobre o alumínio demonstrou ser eficaz em suportar as cargas erosivas identificadas no funcionamento da turbina da COP, além de manter sua característica em resistir corrosão do ambiente atmosférico marinho. O estudo demonstrou que a utilização de tal revestimento evitaria um desgaste tão acentuado das pás da turbina da COP no seu período de maior produção de energia elétrica para abastecimento da ilha do Pico.

Tendo como base este estudo de caso da COP, que é uma das mais importantes usinas do setor de energia das ondas do tipo coluna de água oscilante, construída em 1999 e

encerrada em 2018, e os resultados obtidos nesta pesquisa, espera-se uma melhor qualidade na seleção dos requisitos das propriedades de materiais para fabricação das turbinas OWCs, pois a durabilidade, a eficiência e a vida útil dos materiais utilizados nessas turbinas são fatores relevantes para o avanço da geração de eletricidade por energia das ondas.

Capítulo 8
Sugestões de Trabalhos
Futuros

8 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

A partir da realização deste trabalho é possível fazer as seguintes sugestões de trabalhos futuros:

- a) aperfeiçoar equipamento para desgaste erosivo com o uso de erodentes líquidos e sólidos em conjunto, garantindo uma maior precisão e controle de variáveis de ensaio, bem como sua repetibilidade;
- b) analisar resultados das cicatrizes erosivas com solução salina e areia calibrada encontrando a taxa de crescimento de óxido para os materiais alvo. Esses resultados podem ser importantes, principalmente quando de ensaios erosivos somente com solução salina, já que por haver um desgaste superficial mínimo, por vezes pode ocorrer uma rápida regeneração de óxido ocultando-se o desgaste real e podendo até não se detectar perda de massa ou até mesmo detectar um aumento de massa;
- c) alargar ensaios erosivos/corrosivos e aplicar uma análise estatística para validação dos resultados de taxa de desgaste erosivo e de desgaste corrosivo, bem como correlacionar tais resultados aos efeitos sinérgicos dessas interações;
- d) talvez haja possibilidade de obtenção de patente deste equipamento de desgaste erosivo, bem como de estabelecimento de uma normalização internacional para realização destes ensaios.

BIBLIOGRAFIA

AGENCY, International Energy - IEA. **Electricity Final Consumption**. Disponível em: <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/electricity>. Acesso em: 20/02/2021.

AGUILAR, A.; SAGÜÉS, A.; POWERS, R. **Corrosion Rates of Steel in Concrete**. in: N.S. Berke, V. Chaker, D. Whiting (Eds.), ASTM-STP 1065, American Society for Testing and Materials. p. 66-85, Philadelphia, 1990.

AMARAL, P.; ROSA, L.; PINTO, S.; POZO, D. New line of diamond tools raise productivity in polishing stone. **Industrial Diamond Review**, p. 33-37, 01/01 2004.

ANAND, K.; HOVIS, S. K.; CONRAD, H.; SCATTERGOOD, R. O. Flux effects in solid particle erosion. **Wear**, 118, n. 2, p. 243-257, 1987.

ANAS, N. M.; ABIOYE, T. E.; ANASYIDA, A. S.; DHINDAW, B. K. *et al.* Microstructure, mechanical and corrosion properties of cryorolled-AA5052 at various solution treatment temperatures. **Materials Research Express**, 7, n. 1, 2019.

ANDREA GARFIAS, B.; VICENTE ALBALADEJO, F.; IRENE GARCIA, C.; SERGI, D. Understanding the Influence of High Velocity Thermal Spray Techniques on the Properties of Different Anti-Wear WC-Based Coatings. **Coatings (Basel)**, 10, n. 1157, p. 1157, 2020.

BANK, World; International Energy Agency.- IEA. **Sustainable Energy for All 2015: Progress Toward Sustainable Energy**. Disponível em: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/22148>. Acesso em: 30/04/2017.

BEDILION, R.; BOORAS, G.; MCGOWIN, C.; PHILLIPS, J. *et al.* **Australian Electricity Generation Technology Costs - Reference Case 2010**. Palo Alto, California, p. 231. 2010.

BORRÁS-FORMOSO, R.; FERREIRO-GARCIA, R.; MIGUEL-CATOIRA, A. D.; MIGUÉLEZ-POSE, F. Proposed Improvements in Wave Energy Converter of Oscillating Water Column (WEC-OWC). *In: International Conference on Renewable Energies and Power Quality*, 13, La Coruña, Spain. 2015.

BRIOUA, S.; BELMOKRE, K.; DEBOUT, V.; JACQUOT, P. *et al.* Corrosion behavior in artificial seawater of thermal-sprayed WC-CoCr coatings on mild steel by electrochemical impedance spectroscopy. **Journal of Solid State Electrochemistry**, 16, n. 2, p. 633-648, 2012.

BROOKE, J. **Wave Energy Conversion**. *In: BHATTACHARYYA, R.; McCORMICK, M. E. (Ed.)*. Elsevier Ocean Engineering Book Series, Vol. 06, Elsevier Science, 2003.

BROOMFIELD, J. P., LANGFORD, P.E. AND PAULL, R.J., 1987, Singapore. **Cathodic Protection for Reinforced Concrete: Application to Buildings and Marine Structures**. 654-661.

CALLAWAY, E. Energy: To catch a wave. **Nature**, 450, n. 7167, p. 156, 2007.

CHEN, L.; LAM, W.-H. A review of survivability and remedial actions of tidal current turbines. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 43, p. 891-900, 2015.

CLÉMENT, A.; MCCULLEN, P.; FALCÃO, A.; FIORENTINO, A. *et al.* Wave energy in Europe: current status and perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 6, n. 5, p. 405-431, 2002.

COSTA, M. Y. P.; VENDITTI, M. L. R.; VOORWALD, H. J. C.; CIOFFI, M. O. H. *et al.* Effect of WC-10%Co-4%Cr coating on the Ti-6Al-4V alloy fatigue strength. **Materials Science & Engineering A**, 507, n. 1, p. 29-36, 2009.

COUSENS, A. K.; HUTCHINGS, I. M. A critical-study of the erosion of an aluminum-alloy by solid spherical-particles at normal impingement. **Wear**, 88, n. 3, p. 335-348, 1983.

CRAMER, S. D.; JUNIOR, B. S. C. **Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection**. ASM Handbook Volume 13A, ASM International, 2003. 978-0-87170-705-5.

CRUZ, J. **Ocean Wave Energy - Current Status and Future Prepectives**. 1^a ed. Berlin: Springer, 2008.

CRUZ, J. M. B. P.; SARMENTO, A. J. N. A. **Energia das Ondas: Introdução aos Aspectos Tecnológicos, Económicos e Ambientais**. Portugal: Instituto Superior Técnico and WEC - Wave Energy Centre, 2004. 65 p. 972-8577-11-7.

DARMAWAN, A. S.; SISWANTO, W. A.; PURBOPUTRO, P. I.; ANGGONO, A. D. *et al.* Effect of Increasing Salinity to Corrosion Resistance of 5052 Aluminum Alloy in Artificial Seawater. **Materials Science Forum**. Switzerland: Trans Tech Publications Ltd: 107-111 p. 2019.

DAVIS, J. R.; ASSOCIATES, J. R. D.; COMMITTEE, A. S. M. I. H. **Aluminum and Aluminum Alloys**. ASM International, 1993. 9780871704962.

DIVAKAR, M.; AGARWAL, V. K.; SINGH, S. N. Effect of the material surface hardness on the erosion of AISI316. **Wear**, 259, n. 1-6, p. 110-117, Jul-Aug 2005.

DRESSER-RAND. Oscillating Water Column Technology HydroAir Turbine. 2 p. 2015.

DRIVER, D. Making a material difference in energy. **Energy Policy**, 36, n. 12, p. 4302-4309, 2008.

ENGLAND, G. **Thermal Spray Coatings**. Disponível em: <http://www.gordonengland.co.uk/>. Acesso em: 30/04/2017.

FALCÃO, A. F. de O. First-generation wave power plants: Current status and R&D requirements. **Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering-Transactions of the Asme**, 126, n. 4, p. 384-388, Nov 2004.

FALCÃO, A. F. de O. Wave energy utilization: A review of the technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 14, n. 3, p. 899-918, 2010.

FALCÃO, A. F. de O. Developments in Oscillating Water Column Wave Energy Converters and Air Turbines. *In*: SOARES, C. G. (Ed.). **Renewable Energies Offshore**: CRC Press/Balkema, 2015. cap. 1, p. 3-11.

FALCÃO, A. F. de O.; HENRIQUES, J. C. C. Oscillating-water-column wave energy converters and air turbines: A review. **Renewable Energy**, 85, p. 1391-1424, Jan 2016.

FERNANDES, J. C. S.; FERREIRA, M. G. S. Corrosão Atmosférica do Alumínio. *In*: ELISABETE, M.; ALMEIDA, M.; FERREIRA, M. G. S. (Ed.). **Corrosão Atmosférica Mapas de Portugal**. INETI/IMP/LTR ed. Lisboa, 1997. cap. 4, p. 438.

FILLION, G. APPLYING NICKEL-BASED ALLOYS BY HVOF. **Welding Journal**, 74, n. 10, p. 45-47, Oct 1995.

FINNIE, I. Some reflections on the past and future of erosion. **Wear**, 186, p. 1-10, 1995.

FONTANA, M. G.; GREENE, N. D. **Corrosion Engineering**. McGraw Hill Higher Education, 1986. 9780070214613.

G40-15, A. Standard Terminology Relating to Wear and Erosion. Vol. 03. ASTM International. 02: 9 p. 2015.

G46-94, A. Standard Guide for Examination and Evaluation of Pitting Corrosion. Vol. 04. ASTM International. 8 p. 2013.

G76-13, A. Standard Test Method for Conducting Erosion Tests by Solid Particle Impingement Using Gas Jets. Vol. 13. ASTM International: 6 p. 2013.

G119-09, A. Standard Guide for Determining Synergism Between Wear and Corrosion. Vol. 04. ASTM International. 6 p. 2016.

GENTIL, V. **Corrosão**. 5 ed. Livros Técnicos e Científicos - LTC. 2007. 9788521615569.

GUNN, K.; STOCK-WILLIAMS, C. Quantifying the global wave power resource. **Renewable Energy**, 44, p. 296-304, 2012.

HATCH, J. E. **Aluminum - properties and physical metallurgy**. Automotive Engineering, 92, n. 11, p. 109-109, Ohio: ASM, 1984.

HUDSON, J.; PHILLIPS, D.; WILKINS, N. Review - Materials aspects of wave energy converters. **Journal of Materials Science**, 15, p. 1337-1363, 1980.

HUTCHINGS, I. M. Deformation of metal surfaces by the oblique impact of square plates. **International Journal of Mechanical Sciences**, 19, n. 1, p. 45-52, 1977.

HUTCHINGS, I. M.; LEVY, A. V. Thermal effects in the erosion of ductile metals. **Wear**, 131, n. 1, p. 105-121, 1989.

HUTCHINGS, I. M. **Tribology - Friction and wear of engineering materials**. 1^a ed. Michigan: Elsevier Science, 1992.

HUTCHINGS, I. M.; WINTER, R. E.; FIELD, J. E. Solid particle erosion of metals - removal of surface material by spherical projectiles. **Proceedings of the Royal Society of London Series a-Mathematical Physical and Engineering Sciences**, 348, n. 1654, p. 379-&, 1976.

INSTITUTE, N. M.; CORPORATION, N. B. **Yr - Weather statistics for Pico Island, Azores (Portugal)**. Disponível em: http://www.yr.no/place/Portugal/Azores/Ilha_do_Pico/statistics.html.

JONES, D. A. **Principles and Prevention of Corrosion**. Macmillan Pub Co, 1992. 9780023612152.

KRUGER, J. The nature of the passive film on iron and ferrous alloys. **The German-American Colloquium on Electrochemical Passivation**, 29, n. 2, p. 149-162, 1989.

LE CROM, I.; BRITO-MELO, A.; NEUMANN, F.; SARMENTO, A. Numerical Estimation of Incident Wave Parameters Based on the Air Pressure Measurements in Pico OWC Plant. *In: 8th European Wave and Tidal Energy Conference*, 2009, Sweden. p. 130-139.

LEVY, A. V.; CHIK, P. The effects of erodent composition and shape on the erosion of steel. **Wear**, 89, n. 2, p. 151-162, 1983.

LIEBHARD, M.; LEVY, A. The effect of erodent particle characteristics on the erosion of metals. **Wear**, 151, n. 2, p. 381-390, 1991.

LIMA, C. R. C.; TREVISAN, R. E. **Aspersão Térmica Fundamentos e Aplicações**. 2 ed. ARTLIBER, 2007. 8588098075.

LIPPOLD, J. C.; KOTECKI, D. J. **Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels**. 1ª ed. New Jersey: Wiley-Interscience, 2005.

LIU, J.; WANG, D.; GAO, L.; ZHANG, D. Synergism between cerium nitrate and sodium dodecylbenzenesulfonate on corrosion of AA5052 aluminium alloy in 3wt.% NaCl solution. **Applied surface science**, 389, p. 369-377, 2016.

LOCKWOOD, F.; LEE, S.; FAUNCE, J.; GREEN, J. A. S. *et al.* Pitting Corrosion of 5052 Aluminum Alloy. **Applications of Surface Science**, 20, p. 339-346, 1985.

MAHDIPOOR, M. S.; KIROLS, H. S.; KEVORKOV, D.; JEDRZEJOWSKI, P. *et al.* Influence of impact speed on water droplet erosion of TiAl compared with Ti6Al4V. **Scientific Reports**, 5, n. 1, 2015.

MANN, B. S.; ARYA, V. HVOF coating and surface treatment for enhancing droplet erosion resistance of steam turbine blades. **Wear**. 254, n. 7–8, p. 652-667, 2003.

MANSFELD, F.; FERNANDES, J. C. S. Impedance spectra for aluminum 7075 during the early stages of immersion in sodium chloride. **Corrosion Science**, 34, n. 12, p. 2105-2108, 1993/12/01/ 1993.

MERL, D. K.; PANJAN, P.; CEKADA, M.; GSELMAN, P. *et al.* Tribocorrosion degradation of protective coatings on stainless steel. **Materiali in Tehnologije**, 47, n. 4, p. 435-439, Jul-Aug 2013.

MOLLISON, D.; PONTES, M. T. Assessing the Portuguese wave-power resource. **Energy**. 17, n. 3, p. 255-268, 1992.

NATIONS, United. **Sustainable Development Knowledge Platform**. 2015. Disponível em: <https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld>. Acesso em: 04/05/2017.

NEUMANN, F.; BRITO E MELO, A.; LE CROM, I. Learning Module Pico OWC data exercise. **KIC InnoEnergy - WavEC**, Uppsala, 2001a.

NEUMANN, F.; BRITO E MELO, A.; LE CROM, I. Learning Module: OWC Design; Pico Project. **KIC InnoEnergy - WavEC**, Uppsala, 2001b.

NEUMANN, F.; LE CROM, I. Pico OWC - the Frog Prince of Wave Energy? Recent autonomous operational experience and plans for an open real-sea test centre in semi-controlled environment. *In: 9th European wave and tidal energy Conference (EWTEC)*; 2011 sep 5-9; Southampton, UK.

NIEMI, K.; VUORISTO, P.; MANTYLA, T.; LUGSCHEIDER, E. *et al.* Wear characteristics of oxide coatings deposited by plasma spraying, high power plasma spraying and detonation gun spraying. **Advances in Thermal Spray Science and Technology**, p. 645-650, 1995.

PAIXÃO CONDE, J. M.; GATO, L. M. C. Numerical study of the air-flow in an oscillating water column wave energy converter. **Renewable Energy**, 33, n. 12, p. 2637-2644, 2008.

PATNAIK, A. B.; DAS, S.; JHA, B. B.; PRASANTH, N. Effect of Al– 5Ti– 1B grain refiner on the microstructure, mechanical properties and acoustic emission characteristics of Al5052 aluminium alloy. **Journal of Materials Research and Technology**, 4, n. 2, p. 171-179, 2015.

PEAT, T.; GALLOWAY, A.; TOUMPIS, A.; HARVEY, D. *et al.* Performance evaluation of HVOF deposited cermet coatings under dry and slurry erosion. **Surface & Coatings Technology**, 300, p. 118-127, 2016.

PELC, R.; FUJITA, R. M. Renewable energy from the ocean. **Marine Policy**, 26, n. 6, p. 471-479, 2002.

PICAS, J. A.; PUNSET, M.; BAILE, M. T.; MARTÍN, E. *et al.* Properties of WC-CoCr Based Coatings Deposited by Different HVOF Thermal Spray Processes. **Plasma Processes and Polymers**, 6, n. S1, p. S948-S953, 2009.

PICAS, J. A.; PUNSET, M.; RUPÉREZ, E.; MENARGUES, S. *et al.* Corrosion mechanism of HVOF thermal sprayed WC-CoCr coatings in acidic chloride media. **Surface and Coatings Technology**, 371, p. 378-388, 2019/08/15/ 2019.

RANGEL, R. C. C.; SOUZA, M. E. P.; SCHREINER, W. H.; FREIRE, C. M. A. *et al.* Effect of the fluorination of DLC film on the corrosion protection of aluminum alloy (AA 5052). **Surface & coatings technology**, 204, n. 18, p. 3022-3028, 2010.

SAPTONO, R. Selection of Materials for the Aerofoil Blades of a Wells Turbine Operated in an Oscillating Water Column (OWC) Wave Power Station. **Metallurgy and Materials Engineering**, p. 5, 2004.

SARMENTO, A. **Engineering, analysis and monitoring of full-scale and prototype plants (performance, safety and environmental impacts)**. Deliverable 06 of European Project FP7

ITN 215414 - Wavetrain2, Initial Training Network for Wave Energy Research Professionals - WavEC, 2010.

SEED, M.; LANGSTON, D. Wave Energy - Towards Commercialisation. *In: 3rd International Conference on Ocean Energy - ICOE*, 2010, Voith Hydro Wavegen, Bilbao. p. 1-6.

SHEWMON, P.; SUNDARARAJAN, G. THE EROSION OF METALS. *Annual Review of Materials Science*, 13, p. 301-318, 1983.

SLOT, H. M.; GELINCK, E. R. M.; RENTROP, C.; VAN DER HEIDE, E. Leading edge erosion of coated wind turbine blades: Review of coating life models. *Renewable energy*, 80, p. 837-848, 2015.

SOARES, C. G.; GARBATOV, Y.; ZAYED, A.; WANG, G. Influence of environmental factors on corrosion of ship structures in marine atmosphere. *Corrosion Science*, 51, n. 9, p. 2014-2026, 2009.

STACHOWIAK, G.; BATCHELOR, A. *Engineering Tribology*. Butterworth-Heinemann, 2005. 9780080531038.

STOTT, F. H.; BREAKELL, J. E.; NEWMAN, R. C. The corrosive wear of cast iron under potentiostatically-controlled conditions in sulphuric acid solutions. *Corrosion Science*. 30, n. 8, p. 813-830, 1990.

SUCKLING, M.; ALLEN, C. Critical variables in high temperature erosive wear. *Wear*, 203, p. 528-536, Mar 1997.

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

SUNDARARAJAN, G.; ROY, M. Solid particle erosion behaviour of metallic materials at room and elevated temperatures. *Tribology International*, 30, n. 5, p. 339-359, 1997.

TAYLOR, G. Power buoys: Electricity from waves. *The Economist (US)*, p. 2, 2001.

TAYLOR, J. R. M.; CALDWELL, N. J. Design and Construction of the Variable-Pitch Air Turbine for the Azores Wave Energy Plant. *In: 3^a European Wave Power Conference*, 1998, Patras, Grécia. p. 9.

TEASE, W. K.; LEES, J.; HALL, A. Advances in Oscillating Water Column Air Turbine Development. *In: 7th Europe an Wave and Tidal Energy Conference*, 2007, Porto, Portugal.

TECHNOLOGY, H. O. T. S. **NORMA ASM Introduction to Thermal Spray Processing**. 2004. 0-87170-795-0.

TOMA, D.; BRANDL, W.; MARGINEAN, G. Wear and corrosion behaviour of thermally sprayed cermet coatings. **Surface and Coatings Technology**. 138, n. 2–3, p. 149-158, 2001.

TORRESI, M.; CAMPOREALE, S. M.; STRIPPOLI, P. D.; PASCAZIO, G. Accurate numerical simulation of a high solidity Wells turbine. **Renewable Energy**. 33, n. 4, p. 735-747, 2008.

VARDELLE, M.; VARDELLE, A.; LEGER, A. C.; FAUCHAIS, P. *et al.* Influence of particle parameters at impact on splat formation and solidification in plasma spraying processes. **Journal of Thermal Spray Technology**. 4, n. 1, p. 50-58, 1995.

WANG, Q.; ZHANG, S.; CHENG, Y.; XIANG, J. *et al.* Wear and corrosion performance of WC-10Co4Cr coatings deposited by different HVOF and HVAF spraying processes. **Surface & coatings technology**, 218, n. C, p. 127-136, 2013.

WAVEC. WavEC Offshore Renewables. Disponível em: <https://www.wavec.org/>. Acesso em: 04/05/2017.

WAVEGEN, V. H. Wave Power. Voith Hydro Wavegen: 6 p.

WEEB, I.; SEAMAN, C.; JACKSON, G. **Marine Energy Challenge - Oscillating Water Column Wave Energy Converter Evaluation Report**. Carbon Trust Arup Energy Report, Feb 2005.

WENGENMAYR, R.; BÜHRKE, T. **Renewable Energy: Sustainable Energy Concepts for the Future**. John Wiley & Sons, 2011.

WOLYNEC, S. **Técnicas eletroquímicas em corrosão**. EDUSP, São Paulo, 2003. 8531407494.

WOOD, R. J. K. Erosion–corrosion interactions and their effect on marine and offshore materials. **Wear**, 261, n. 9, p. 1012-1023, 2006.

WOOD, R. J. K.; BAHAJ, A. S.; TURNOCK, S. R.; WANG, L. *et al.* Tribological design constraints of marine renewable energy systems. **Philosophical Transactions of the Royal Society A**, 368, n. 1929, p. 4807-4827, 2010.

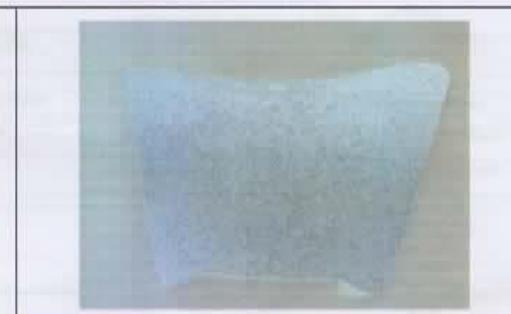
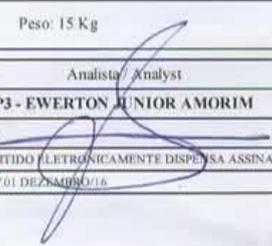
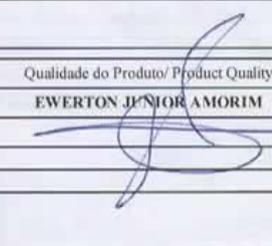
ZHANG, D.; LI, W.; LIN, Y. Wave energy in China: Current status and perspectives. **Renewable Energy**. 34, n. 10, p. 2089-2092, 2009.

ZHANG, S.; JOHANSEN, K. D.; BERNAD, P. L.; KIIL, S. Rain erosion of wind turbine blade coatings using discrete water jets: Effects of water cushioning, substrate geometry, impact distance, and coating properties. **Wear**, 328-329, p. 140-148, 2015.

ZHU, C.; YANG, H.; WANG, Y.; ZHANG, D. *et al.* Synergistic effect between glutamic acid and rare earth cerium (III) as corrosion inhibitors on AA5052 aluminum alloy in neutral chloride medium. **Ionics**, 25, n. 3, p. 1395-1406, 2019.

- ANEXO I -

Certificado de qualidade do produto A356.0 T6/AlSi₇Mg_{0,3}

|  | | CERTIFICADO DA QUALIDADE DO PRODUTO / PRODUCT QUALITY CERTIFICATE | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|----------------|----------------|--------------|-----------------|---------------|-----------------|---------------|----------------|----------------|---------------|
| CERTIFICADO DE ANÁLISE / ANALYSIS CERTIFICATE N° 00000635 | | DATA / DATE: 14/07/2017 | | | | | | | | | | | |
| CLIENTE / CUSTOMER: FUNDAÇÃO LUIZ ENGLERT | | NF / DOCUMENT: 1068 | | | | | | | | | | | |
| LIGA / ALLOY: IB336AJ | COR / COLOR: SEM COR | LOTE / LOT: C2012/0617 | NORMA SAE / SAE STANDARD: - | | | | | | | | | | |
| Resultado da Análise Metalográfica / Metallography Analysis Result | | | | | | | | | | | | | |
|  | |  | | | | | | | | | | | |
| Foto Micro / Photomicrography | | Foto Macro / Photomacrography | | | | | | | | | | | |
| <input checked="" type="checkbox"/> Aprovado/Approved | <input type="checkbox"/> Reprovado/Reproved | <input checked="" type="checkbox"/> Aprovado/Approved | <input type="checkbox"/> Reprovado/Reproved | | | | | | | | | | |
| Observações / Análise Macro: Nível 02 de porosidades. Análise Micro: Apresenta estrutura formada por dendritas, silício em formato lamelar e acicular. Observations: Intermetálicos de Fe/Mn com morfologia não definida, Sludge nível 00 e microporosidades. | | | | | | | | | | | | | |
| Resultado da Análise Química / Chemical Analysis Result | | | | | | | | | | | | | |
| Elementos/ Elements | Si SILÍCIO | Fe FERRO | Cu COPRE | Mn MANGANES | Mg MAGNESIO | Cr CROMO | Ni NIQUEL | Zn ZINCO | Ti TITÂNIO | Be BERÍLIO | Bi BISMUTO | Ca CALCÍO | Cd CADMÍO |
| Nominal/ Designation | 8,80000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,22000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,11000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| Resultado/ Result | 7,40000 | 0,12000 | 0,02000 | 0,05000 | 0,28000 | 0,03000 | 0,03000 | 0,07000 | 0,15000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00300 | 0,03000 |
| Elementos/ Elements | Co COBALTO | Ga GALIO | Li LÍTIO | Na SÓDIO | P FÓSFORO | Pb CHUMBO | Sb ANTIMÔNIO | Sn ESTANHO | Sr ESTRÔNCIO | V VANÁDIO | Zr ZIRCONÍO | Al ALUMÍNIO | Out OUTROS |
| Nominal/ Designation | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,02400 | 0,00000 | 0,00000 | 91,75000 | 0,00000 |
| Resultado/ Result | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,03000 | 0,00000 | 0,00000 | 92,84000 | 0,10000 |
| <input checked="" type="checkbox"/> Aprovado/Approved | <input type="checkbox"/> Reprovado/Reproved | | | | | | | | | | | | |
| Observações / Peso: 15 Kg Observations: | | | | | | | | | | | | | |
| Analista / Analyst | Qualidade do Produto / Product Quality | | | | | | | | | | | | |
| P3 - EWERTON JUNIOR AMORIM | EWERTON JUNIOR AMORIM | | | | | | | | | | | | |
| Visto/Signature | Visto/Signature: | | | | | | | | | | | | |
|  |  | | | | | | | | | | | | |
| <small>CERTIFICADO EMITIDO ELETRONICAMENTE DESPESAS ASSINATURA FOR-LAB-002 REV.01 DEZ/2009/16</small> | <small>14/07/2017 - 08:35</small> | | | | | | | | | | | | |

- ANEXO II -

Parâmetros utilizados no processo de HVOF



1.9.2.2SH-1350V-1

Worldwide Leaders in Thermal Spray Technologies
 146 Pembroke Road Concord, NH 03301
 TEL: 603/224-9585 FAX: 603/225-4342 HTTP://www.tafa.com

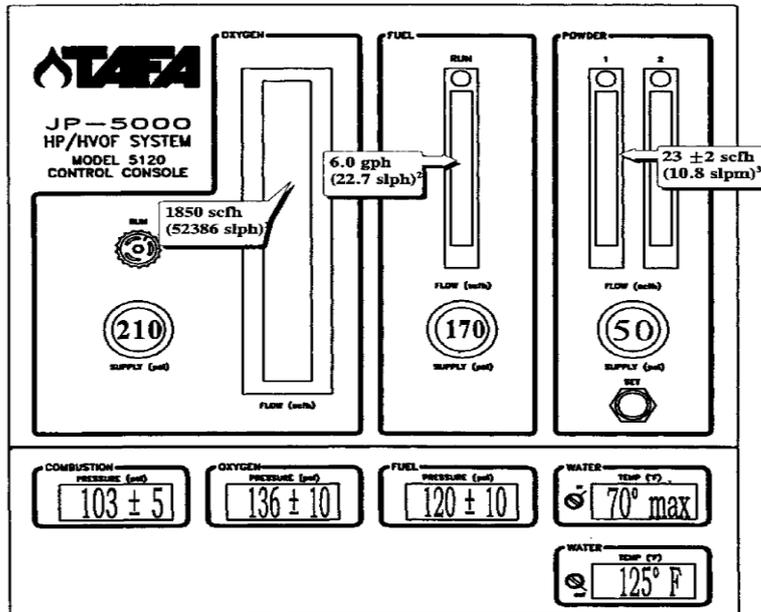
Technical Data

File: 1.9.2.2SH-1350V-1
 Issue: M10409
 Supersedes: J11012

SPRAY PARAMETERS
1350V 86% Tungsten Carbide - 10% Cobalt - 4% Chromium

Although parameters vary, the following settings are recommended as starting points for this coating. Some modification of the parameters may further enhance the coating quality.

| | | | |
|-----------------|-----------------|--------------------|-------------------------|
| Spray System: | JP-5000 HP/HVOF | Spray Rate: | 13 lb/hr (98 g/min) |
| Gun Barrel: | 4" or 8" Length | Feeder Speed: | 330 rpm (6 pitch screw) |
| Spray Distance: | 15" (380 mm) | Coating Thickness: | 0.050" [1.3 mm] |



- Oxygen Flow** - The above flow setting is based on 210 psi supply pressure. For different supply pressures, use the Pressure Correction Chart in the Operation Section of the Manual to determine the correct flow for scfh specified above.
- Fuel Flow** - Users of older control consoles with a 0 to 100% tube in the fuel flowmeter should consult Tafa for the correct settings.
- Carrier Flow** - The needle valve above the powder feeder flowmeter should be left wide open and the flow should be adjusted with the needle valve on the console flowmeter. All flow rates are for nitrogen.

Copyright © 1996 Tafa Incorporated, Concord, NH - USA. All rights reserved.

- ANEXO III -

Características do carboneto de tungstênio-cobalto-cromo (WC-CoCr)

Certificate of Analysis & Certificate of Conformity

PRAXAIR
SURFACE TECHNOLOGIES
1555 Main Street, Indianapolis, IN 462

Product Name: 1350VF / WC-731 Customer: Ship Date: 05/17/2017
Praxair Spec: 011116-BK Shipping Order #: 915027694 Printed Date: 17/MAY/2017
Item Number: 011116-10 Customer PO #: 8895887
Lot Number: 86 Quantity: 440 UM: LBS

* All elements measured in weight percent unless otherwise specified. Sampling Method per ASTM B

| Chemistry | Test Method | Test Lab | Min | Max | Result | OK |
|---------------------|-------------|----------|-----|---------|---------|-----|
| Carbon (total) | Leco | Praxair | 5.0 | 5.5 | 5.3 | Yes |
| Cobalt | XRF | Praxair | 9.0 | 11.0 | 10.2 | Yes |
| Chromium | XRF | Praxair | 3.0 | 5.0 | 4.3 | Yes |
| Iron | XRF | Praxair | | 0.4 | 0.0 | Yes |
| Total All Other | XRF | Praxair | | 1.5 | 0.2 | Yes |
| Tungsten | By Diff | Praxair | | Balance | Balance | Yes |
| Microtrac | Test Method | Test Lab | Min | Max | Result | OK |
| +22 | Microtrac | Praxair | 45 | 75 | 59 | Yes |
| +44 | Microtrac | Praxair | | 35 | 6 | Yes |
| +11 | Microtrac | Praxair | | 4 | 3 | Yes |
| -31 | Microtrac | Praxair | 20 | 75 | 71 | Yes |
| -5.5 | Microtrac | Praxair | | 0.5 | 0.2 | Yes |
| -62 | Microtrac | Praxair | 90 | | 100 | Yes |
| -88 | Microtrac | Praxair | 95 | | 100 | Yes |
| Sieve per ASTM B214 | Test Method | Test Lab | Min | Max | Result | OK |
| +270 | ASTM B214 | Praxair | | 0 | 0 | Yes |
| +325 | ASTM B214 | Praxair | | 0.5 | 0.1 | Yes |
| +400 | ASTM B214 | Praxair | | 10 | 3 | Yes |
| +500 | ASTM B214 | Praxair | | Report | 29.61 | Yes |
| +635 | ASTM B214 | Praxair | | Report | 62.68 | Yes |

PST: 175101 C-92337

Spec ranges shown above in italics are target or nominal specifications

* indicates test is not required for routine acceptance



(317) 240-2650
Telefax (317) 240-2225
Toll-Free Telefax 1-800-234-6738 U.S.A. **AS9100 Register
Quality System**

Materials Testing Laboratory

This report is confidential and proprietary, and intended for the recipient of the product. If you receive in error you are prohibited from disclosing, copying, distributing, or using any of the information. The test report shall not be reproduced except in full, without the written approval of the laboratory. Please contact our office for instructions. The recording of false, fictitious, fraudulent statements or entries on the certificate may be punished as a felony under federal law. All elements measured in percent unless otherwise specified. Rounding is per ASTM E29.

Estimated uncertainty of measurement is available upon request.

Material : 678100011
Descrição: 1350VF/WC-731 - PO 4.54KG
Lote: 86

Peso : 99,88 Kg

LINCOLN
ELECTRIC
01 AGO 2017
RECEBIDO

INSPECIONADO - RECEBIMENTO
Adriano 03.08.17
Assinatura / Data

APROVADO - QUALIDADE
MARIA 03/08/17
Assinatura / Data

– ANEXO IV –

Carta de apoio à pesquisa do WavEC



SUPPORT LETTER

Lisbon, 15/05/2017

The reliability of wave energy converters is a key issue at the current development stage of the technology. Dedicated component testing, structural integrity analysis of components and study of material phenomena in the harsh marine environment, play an important role in the reliability of devices.

The applicant team aims to study corrosion effects in wave energy projects, in particular on the air turbine blades of oscillating water column (OWC) devices in order to assess and improve the reliability of wave energy devices and components. Most of the failures and reliability issues are due to the fact that actual load conditions in the field are not well understood and the associated reliability is difficult to predict.

The OWC is one of the promising wave energy technologies being developed by a number of countries. Pico Plant, one of the oldest power plants built in the 90s, grid connected and still operational, offers the possibility to analyse pertinent reliability aspects of the long marine exposure of the mechanical and electrical equipment.

Therefore, WavEC encourages the access to Pico Plant as a unique large-scale OWC component test facility, recognising the pertinence of the study presented by the applicant team.

With best regards

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Ana Brito e Melo".

Ana Brito e Melo
Executive Director

Rua D. Jerónimo Osório, n.º 11, 1º andar
1400 – 119 Lisboa

Tel: +351 21 848 2655
Fax: +351 21 848 1630
Email: mail@wavec.org
Web: www.wavec.org
VAT/NIF: 506358267

- ANEXO V -

Projeto da pá reserva da COP

