



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**  
**ENGENHARIA MECÂNICA**

**METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DE DESGASTE ABRASIVO**  
**EM PÁS DE ROTOR DE BOMBAS CENTRÍFUGAS DE ESTAÇÃO**  
**ELEVATÓRIA**

**RODRIGO OTÁVIO PERÉA SERRANO**

**Belo Horizonte**

**2017**

Rodrigo Otávio Peréa Serrano

**METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DE DESGASTE ABRASIVO EM PÁS DE  
ROTOR DE BOMBAS CENTRÍFUGAS DE ESTAÇÃO ELEVATÓRIA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Energia e Sustentabilidade

Orientador: Prof. Carlos Barreira Martinez

(Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG)

Co-orientadora: Profa. Edna Maria de Faria Viana

(Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG)

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2017

S487m

Serrano, Rodrigo Otávio Peréa.

Metodologia para avaliação de desgaste abrasivo em pás de rotor de bombas centrífugas de estação elevatória [manuscrito] / Rodrigo Otávio Peréa Serrano. - 2017.

121 f., enc.: il.

Orientador: Carlos Barreira Martinez.

Coorientadora: Edna Maria de Faria Viana.

Tese (doutorado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Anexos: f. 120-121.

Bibliografia: f. 108-119.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Bombas centrífugas - Teses. 3. Desgaste abrasivo - Teses. I. Martinez, Carlos Barreira. II. Viana, Edna Maria de Faria. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 621(043)



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**  
**ENGENHARIA MECÂNICA**

Av. Antônio Carlos, 6627 - Campus Universitário  
31270-901 - Belo Horizonte - MG  
Tel.: +55 31 3409.5145  
E-mail: [cpgmec@demec.ufmg.br](mailto:cpgmec@demec.ufmg.br)

**"METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DE DESGASTE ABRASIVO  
EM PÁ DE ROTOR DE BOMBA CENTRÍFUGA DE ESTAÇÃO  
ELEVATÓRIA"**

**RODRIGO OTÁVIO PERÉA SERRANO**

Tese submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "**Doutor em Engenharia Mecânica**", na área de concentração de "**Energia e Sustentabilidade**".

Tese aprovada no dia 07 de dezembro de 2017.

Por:

**Prof. Carlos Barreira Martinez**  
Orientador - Depto. de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos/UFMG

**Prof. Edna Maria de Faria Viana**  
Depto. de Eng. Hidráulica e Recursos Hídricos/UFMG

**Prof. Maria Aparecida Pinto**  
Universidade Federal de Ouro Preto

**Prof. Paulo Henrique Vieira Magalhães**  
Universidade Federal de Ouro Preto

**Prof. Eduardo Bauzer Medeiros**  
Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG

**Prof. Jorge Luis Zegarra Tarqui**  
Depto. de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos/UFMG

**Prof. Aloysio Portugal Maia Saliba**  
Depto. de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos/UFMG

## **DEDICATÓRIA**

A minha esposa Manoela Costa de Araújo Peréa  
Serrano, pelo incentivo e apoio durante todas as fases  
dessa empreitada.

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, por tudo.

Ao Professor Dr. Carlos Barreira Martinez, pela orientação, compreensão, dedicação e pelas discussões valiosas que enriqueceram o trabalho. Obrigado também, pelas oportunidades de aprendizado em diferentes áreas de conhecimento, mostrando a importância do trabalho em equipe. Não esquecendo, é claro, da valiosa amizade;

A professora Dra. Edna Maria de Faria Viana, pela dedicação e orientações no horário de almoço;

A professora Dra. Maria Aparecida Pinto, pela colaboração e orientação nos ensaios que foram fundamentais ao desenvolvimento desta tese;

Ao professor Dr. Gilberto da UFOP pelo apoio no laboratório NanoLab durante os vários dias dedicados as leituras das calotas de desgaste;

Aos meus amigos Afonso, Mila, Andrés, Tamara e Stenio pelo apoio e especial agradecimento aos Patrik, Ana e Genivaldo pela atenção especial e ajuda ao desenvolvimento deste estudo;

Aos laboratórios CPH da UFMG, Nanolab, LTM e Microabrasão da UFOP, pelo apoio técnico e tecnológico fundamentais para execução desta tese;

A minha esposa, pelo incentivo, paciência, companheirismo e carinho que foram imprescindíveis para conclusão de mais essa etapa de vida;

A minha Mãe, por ter me dado a vida e sempre curtindo cada um dos obstáculos vencidos. Toda as suas bênçãos foram muito importantes;

A minha avó Wanda pelos sábios ensinamentos escritos nas entrelinhas do seu olhar e nas ligeiras mão;

À minha família, especialmente aos meus filhos que não puderam me acompanhar nessa empreitada, que são um dos motivos pela dedicação a essa conquista;

A todas as pessoas que, de alguma forma, contribuíram para a finalização desta etapa, ou o início de muitas outras.

## SUMÁRIO

<b>SUMÁRIO .....</b>	<b><u>I</u></b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b><u>II</u></b>
<b>LISTA DE GRÁFICOS .....</b>	<b><u>III</u></b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b><u>IV</u></b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....</b>	<b><u>V</u></b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS.....</b>	<b><u>VI</u></b>
<b>RESUMO .....</b>	<b><u>VII</u></b>
<b>ABSTRACT:.....</b>	<b><u>VIII</u></b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>22</b>
<b>2 HIPÓTESE .....</b>	<b>24</b>
<b>3 OBJETIVOS.....</b>	<b>25</b>
3.1 OBJETIVO GERAL .....	25
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	25
<b>4 REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	<b>26</b>
4.1 CIÊNCIAS E ENGENHARIA DOS MATERIAIS .....	28
4.1.1 Tribologia.....	29
4.1.2 O atrito.....	30
4.1.3 Desgaste.....	31
4.1.4 Abrasivos.....	33
4.1.5 Distribuição de tamanhos das partículas .....	35
4.1.6 Desgaste erosivo .....	36
4.1.7 Desgaste por abrasão e erosão.....	39
4.2 MECANISMOS DE HIDRO-ABRASÃO .....	40
4.2.1 Sedimento.....	41
4.2.2 Efeito abrasivo em bombas .....	42
4.2.3 Efeito técnico e econômico causado pela erosão dos rotorer de bombas.....	43
4.3 SISTEMA DE BOMBEAMENTO DE UMA EEAB. ....	44



4.4	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO SISTEMA DE BOMBEAMENTO. ....	50
4.5	HISTÓRICO DO SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA NO BRASIL. ....	53
4.6	CARACTERIZAÇÃO DE UMA ETA .....	55
4.7	CARACTERIZAÇÃO DAS ÁGUAS DE UM RIO AMAZÔNICO: O CASO DO RIO ACRE .....	55
<b>5</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>57</b>
5.1	DESGASTE DO ROTORES PELA ABRASÃO DOS SEDIMENTOS .....	57
5.1.1	<i>Determinação das características construtivas do rotor.....</i>	<i>57</i>
5.1.2	<i>Determinação das forças nas pás do rotor.....</i>	<i>64</i>
5.1.3	<i>Ensaio de resistência ao desgaste abrasivo do tipo esfera-sobre-placa .....</i>	<i>66</i>
5.2	DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHOS DAS PARTÍCULAS ABRASIVAS .....	75
5.2.1	<i>Análise morfometria dos grãos de sedimentos separados por peneiramento. ....</i>	<i>75</i>
5.3	ANÁLISE DAS CALOTAS POR MICROSCOPIA ELETRÔNICO DE VARREDURA .....	76
5.4	ESTIMATIVA DO DESGASTE DO ROTOR .....	77
5.4.1	<i>Estimativa do desgaste em função da variação da cota do Rio Acre.....</i>	<i>77</i>
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>79</b>
6.1	ANÁLISE PRÉVIA DE ROTORES REAIS .....	79
6.1.1	<i>Rotor em aço inoxidável .....</i>	<i>79</i>
6.1.2	<i>Rotor em ferro fundido.....</i>	<i>80</i>
6.2	CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DO ROTOR. ....	81
6.3	CAMPOS DE VELOCIDADE DO ROTOR DE REFERÊNCIA .....	83
6.4	DETERMINAÇÃO DAS FORÇAS APLICADAS NA PÁ .....	84
6.5	ANÁLISE DAS AMOSTRAS DAS LIGAS METÁLICAS.....	86
6.6	ANÁLISE DOS SEDIMENTOS EROSIVOS DO RIO ACRE.....	87
6.7	ENSAIOS DE ABRASÃO POR ESFERA ROTATIVA E ANÁLISE DAS CALOTAS .....	89
6.7.1	<i>1ª etapa: Determinação da força aplicada durante o ensaios.....</i>	<i>89</i>
6.7.2	<i>2ª etapa: determinação do desgaste em função da carga de sedimento.....</i>	<i>94</i>
6.7.3	<i>3ª etapa: comparação da abrasividade do sedimento com carboneto de silício.....</i>	<i>98</i>
6.8	DETERMINAÇÃO DO DESGASTE DA PÁ .....	101
6.9	ROTEIRO PARA IMPLEMENTAÇÃO DA TÉCNICA.....	103
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>105</b>
<b>8</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>107</b>
<b>9</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>108</b>

**10 ANEXO A .....120**  
**11 ANEXO B.....121**

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 4.1 – Rotor de uma bomba centrífuga com elevado desgastes por abrasão, erosão e corrosão.....	26
FIGURA 4.2 – Fluxograma da inter-relação entre estrutura, propriedade e processamento. ....	28
FIGURA 4.3 – Fluxograma da interação do atrigo, desgaste e lubrificação no estudo tribológico.....	29
FIGURA 4.4 – Seis fases do mecanismo de fricção que ocorre entre contatos deslizantes na fase inicial.....	31
FIGURA 4.5 – Quatro principais mecanismos de desgaste. ....	32
FIGURA 4.6 – O desgaste abrasivo, causado por abrasivos aprisionados ou livres.....	33
FIGURA 4.7 – Efeito abrasivo da fragilidade e resistência do grão. ....	34
FIGURA 4.8 – Diâmetros equivalentes de uma partícula. ....	36
FIGURA 4.9 – Possíveis mecanismos de desgaste erosivo: a) abrasão a baixo ângulo de impacto; b) fadiga da superfície a velocidade baixa e alto ângulo de impacto; c) fratura frágil ou múltiplas deformações plásticas durante impacto a médias velocidades e alto ângulo. ....	38
FIGURA 4.10 – Três principais modos de desgaste .....	39
FIGURA 4.11 – Três principais modos de desgaste erosivo.....	39
FIGURA 4.12 – Redução do desempenho causado pela desgaste do rotor de uma bomba centrífuga (1) rotor novo e (2) rotor desgastado.....	44
FIGURA 4.13 – Classificação de rotores de bombas centrífugas .....	46
FIGURA 4.14 – Vista em corte: Bomba centrífuga em voluta caracol.....	47
FIGURA 5.1 – Sequência de processamento do algoritmo.....	58
FIGURA 5.2 – Triângulos de velocidade na entrada (a) e saída (b) da pá de um rotor. ....	61
FIGURA 5.3 – Triângulos de velocidade na entrada (a) e saída (b) da pá de um rotor decomposto.....	62
FIGURA 5.4 – Diagrama de velocidade de uma partícula líquida.....	63
FIGURA 5.5 – Esquema de divisão das seções estudadas do rotor .....	64
FIGURA 5.6 – Diagrama esquemático do dispositivo de ensaio de microabrasão.....	66
FIGURA 5.7 – Calota Esférica produzida pelo desgaste abrasivo na peça.....	67

FIGURA 5.8 – Abrasômetro de esfera rotativa da UFOP.....	69
FIGURA 5.9 – Vista lateral do abrasômetro de esfera rotativa da UFOP.....	69
FIGURA 5.10 – Amostras das ligas metálicas utilizadas nos ensaios de abrasão. ....	73
FIGURA 5.11 – Representação esquemática do método de lixamento .....	73
FIGURA 5.12 – Polimento das amostra em politriz de bancada.....	74
FIGURA 5.13 – Preparação das suspensões abrasivas com sedimentos do rio Acre .....	74
FIGURA 5.14 – Preparo de soluções abrasivas (Sedimento e SiC).....	75
FIGURA 5.15 – Exemplos das ampliações utilizadas na análise das calotas de desgaste.....	76
FIGURA 6.1 – Desgaste por abrasão de sedimentos em um rotor fechado de bomba centrífuga (KSB): a) Vista frontal do rotor; b) Saída do rotor; c) Zona de cisalhamento da pá.....	80
FIGURA 6.2 – Desgaste por abrasão de sedimentos em um rotor aberto de bomba centrífuga (Flygt): a) Vista frontal da parte posterior do rotor; b) Zona de cisalhamento da pá; c) Desgaste da zona de saída do rotor; d) Sulcos de desgaste na saída do rotor .....	80
FIGURA 6.3 – Duas ampliações que mostram a incrustação de quartzo em uma pá do rotor de bomba centrífuga, proveniente do sedimento que foi bombeado .....	81
FIGURA 6.4 – Projeto do rotor com base nas características construtivas geradas pelo algoritmo.....	82
FIGURA 6.5 – Vetores d velocidade na entrada e na saída do rotor de projeto .....	83
FIGURA 6.6 – Representação das 5 seções, para estimativa de desgaste.....	84
FIGURA 6.7 – Análise metalográfica das ligas metálicas utilizadas nos ensaios .....	87
FIGURA 6.8 – Morfologia classificada dos sedimentos erosivos presentes nas águas do Rio Acre, coletados do tanque de desarenação da ETA II. ....	88
FIGURA 6.9 – Análise do delineamento das calotas de desgaste por imagem MEV.....	92
FIGURA 6.10 – Avaliação do padrão de desgaste em função do $F_N$ (MEV). (A) Deformação plástica. ....	93
FIGURA 6.11 – Influencia da concentração de sedimentos no diâmetro da calota de desgaste (MEV).....	96
FIGURA 6.12 – Avaliação do padrão de desgaste em função da concentração de sedimentos (MEV). (A) Deformação plástica e (B) Pontos de arrancamento da dos acúmulos a frente dos sulcos. ....	97

FIGURA 6.13 – Influencia do material abrasivo (Sedimento e SiC), no diâmetro da calota de desgaste.....	98
FIGURA 6.14 – Avaliação do padrão de desgaste em função do material abrasivo .....	100

## LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 4.1 – Curva de desempenho e influência do desgaste no ponto de operação. ....	49
GRÁFICO 6.1 – Variação da velocidade relativas ( $w$ ) em função da variação da rotação da bomba: $w_1$ entrada e $w_2$ saída. ....	84
GRÁFICO 6.2 – Variação da $F_D$ em função do raio de cada seção do rotor e da variação da rotação de 80% à 100%. ....	85
GRÁFICO 6.3 – Distribuição granulométrica de sedimentos do rio Acre, dragados pela EEAB. ....	88
GRÁFICO 6.4 – Variação da taxa de desgaste ( $Q$ ) em função da variação de $F_N$ . ....	89
GRÁFICO 6.5 – Comportamento do coeficiente de desgaste específico ( $K$ ) em função da variação da concentração de sedimento, para as condições de ensaio ( $S = 180$ m e $F_N = 3$ N). ....	94
GRÁFICO 6.6 – Volume de desgaste em função do material abrasivo. ....	100
GRÁFICO 6.7 – Avaliação do desgaste da pá do rotor em função da variação da carga de sedimentos do Rio Acre: Com controle rotacional (C/C) e sem controle rotacional (S/C). ....	101
GRÁFICO 6.8 – Desgaste acumulado da pá do rotor em função da variação da carga de sedimentos do Rio Acre: Com controle rotacional (C/C) e sem controle rotacional (S/C). ....	102
GRÁFICO 6.9 – Desgaste relativo da pá do rotor em 1 ano de trabalho: Com controle rotacional (C/C) e sem controle rotacional (S/C), ....	103

## LISTA DE TABELAS

TABELA 4.1 – Resumo dos resultados encontrados da pesquisa realizada em 09/05/2016 na Web of Science, sobre erosão e abrasão de rotores por sedimento em suspensão na água bruta bombeada.....	27
TABELA 4.2 – Fenômenos tribológicos.....	30
TABELA 4.3 – Comparação da dureza Moh's com a intendida da abrasão hidráulica.....	42
TABELA 5.1 – Resumo do desenho amostral dos ensaios de abrasão.....	71
TABELA 4.5 – Análise ANOVA.....	71
TABELA 6.1 – Características construtivas calculadas a partir do algoritmo de Palomino (2017).....	82
TABELA 6.2 – Variação das velocidades do fluido em função da diminuição da rotação da bomba.....	83
TABELA 6.3 – Variação das forças em função da área da seção.....	85
TABELA 6.4 – Composição química das ligas metálicas.....	86
TABELA 6.5 – Análise de variância (ANOVA) da variação do diâmetro da calota em função da $F_N$ e do tipo de material da amostra.....	90
TABELA 6.6 – Análise do aumento do diâmetro em função de $F_N$ e do tipo material da amostra, pelo teste de Tukey.....	91
TABELA 6.7 – Análise de variância (ANOVA) da variação do coeficiente de desgaste ( $K$ ) em função do $F_N$ e do material da amostra.....	91
TABELA 6.8 – Análise do $K$ em função de $F_N$ , pelo teste de Tukey.....	92
TABELA 6.9 – Análise de variância (ANOVA) da variação do diâmetro da calota em função da concentração de sedimentos na solução abrasiva e do tipo da composição da amostra.....	95
TABELA 6.10 – Análise do diâmetro das calotas em função de da concentração de sedimentos, pelo teste de Tukey.....	95
TABELA 6.11 – Análise de variância (ANOVA) da variação do diâmetro da calota do material abrasivo utilizado (sedimento e SiC) e do tipo da composição da amostra.....	99

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT-NBR	–	Associação Brasileira de Normas Técnicas – Norma Brasileira.
AESBE	–	Associação das Empresas de Saneamento Básico Estaduais.
ANOVA	–	<i>Analysis of variance</i>
ASLE	–	<i>American Society of Lubrication Engineers</i>
ASTM	–	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BNH	–	Banco Nacional de Habitação
CPH	–	Centro de Pesquisas Hidráulicas e Recursos Hídricos
DIN	–	<i>Deutsches Institut für Normung</i> (Instituto Alemão para Normatização)
dms	–	Diferença mínima significativa
EEAB	–	Estação Elevatória de Água Bruta
ETA	–	Estação de Tratamento de Água
FGTS	–	Fundo de Garantia por Tempo de Serviço
FGV	–	Fundação Getúlio Vargas
FoFo	–	Ferro fundido
FUNASA	–	Fundação Nacional da Saúde
HRA	–	Dureza Rockwell A
MEV	–	Microscópio de Varredura Eletrônica.
MIEI	–	V.V. Kuibyshev Moscow Civil Engineering Institute
NBR	–	Norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT)
NPSH	–	Sucção Líquida Positiva
OECD	–	<i>Organization for Economic Cooperation and Development</i>
pH	–	Potencial Hidrogeniônico
PIB	–	Produto Interno Bruto



PLANASA – Plano Nacional de Saneamento

PLANSAB – Plano Nacional de Saneamento Básico

SAE – *Society of Automotive Engineers - EUA*

SESP – Serviço Especial de Saúde Pública

SEPURB – Secretaria de Política Pública

QMTrat – Médias dos quadrados (tratamento)

QMRes – Média dos quadrados (Resíduo)

SNSA – Secretaria de Saneamento Ambiental

SQTrat – Soma dos quadrados (tratamento)

SQRes – Soma dos quadrados (resíduo)

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$	Área	[m <sup>2</sup> ]
$b_1$	Largura da pá à entrada do rotor	[m]
$b_{2(ret)}$	Largura da pá retificada	[m]
$Cd$	Coefficiente de arrasto	
$D$	Diâmetro da calota	[m]
$d'l$	Diâmetro da boca de entrada	[m]
$d_2$	Diâmetro de saída do rotor	[m]
$d_{2(ret)}$	Diâmetro de saída retificado	[m]
$dei$	Diâmetro do eixo	[m]
$dei_{corr}$	Diâmetro do eixo corrigido	[m]
$d_{m1}$	Diâmetro médio da aresta de entrada do rotor	[m]
$dn$	Diâmetro do núcleo	[m]
$F$	Força aplicada	[N]
$f_{at}$	Força de atrito	[N]
$F_D$	Força de arrasto abrasivo	[N]
$F_N$	Força normal aplicada a superfície da amostra	[N]
$g$	Constante gravitacional	[m/s <sup>2</sup> ]
$H$	Altura manométrica	[m]
$H'e$	Altura de elevação (adotando: $\psi$ de 1,1 a 1,2)	[m]
$H_{dp}$	Dureza da partícula	[N/mm <sup>2</sup> ]
$He$	Altura desejada	[m]
$H_m$	Dureza do material	[N/mm <sup>2</sup> ]
$k$	Coefficiente de desgaste	
$K$	Coefficiente de desgaste específico do material em função de um abrasivo	[m <sup>3</sup> /Nm]
$K_{rd}$	Razão de dureza	
$kv'l$	Coefficiente de velocidade na boca de entrada do rotor	
$k_{vm1}$	Coefficiente de velocidade da componente meridiana de entrada do rotor	
$k_{vm2}$	Coefficiente de velocidade de saída do rotor	
$mca$	Metros de coluna de água	[m]
$n$	Rotação	[rpm]
$N$	Potência de acionamento	[cv]

$N_{CV}$	Potência motriz	[cv]
$nq$	Rotação específica	[rpm]
$q$	Volume de material removido	[m <sup>3</sup> ]
$Q$	Vazão de escoamento	[m <sup>3</sup> /s]
$Q'$	Vazão de recalque corrigida devido à recirculação	[m <sup>3</sup> /s]
$Q_D$	Volume teórico removido	[m <sup>3</sup> ]
$Q_{gpm}$	Vazão em gpm	
$Q_T$	Taxa teórica de desgaste	[m <sup>3</sup> /m]
$R$	Raio da esfera	[m]
$Re$	Reynolds	
$rpm$	Rotações por minuto	
$S$	Distancia de deslizamento	[m]
$S_1$	Espessura das pás na entrada do rotor	[m]
$S_1$	Espessuras das pás na entrada do rotor	[m]
$S_2$	Espessura das pás na saída do rotor	[m]
$t$	Tempo de funcionamento da bomba	[s]
$t_1$	Passo circunferencial entre pás na entrada do rotor	[m]
$t_2$	Passo circunferencial entra as pás	[m]
$u_1$	Velocidade periférica no bordo de entrada do roto	[m/s]
$u_2$	Velocidade periférica na saída do rotor	[m/s]
$u_{2(corr)}$	Velocidade periférica na saída do rotor (corrigido)	[m/s]
$V$	Velocidade de escoamento do fluido	[m/s]
$v'l$	Velocidade média na entrada do rotor	[m/s]
$v^2/2g$	Energia cinética	
$v_{m1}$	Velocidade meridional na entrada do rotor	[m/s]
$v_{m2}$	Velocidade meridional na saída do rotor	[m/s]
$x$	Comprimento do deslocamento de fluido	[m]
$Z$	Número de pás	
$\beta l$	Ângulo de inclinação da pá de entrada	[°]
$\Delta H$	Variação da altura manométrica	[m]
$\varepsilon$	Rendimento hidráulica	[%]
$\eta$	Rendimento	[%]
$\eta_t$	Rendimento total máximo	[%]

$\mu$	Coeficiente de atrito	
$\nu$	Viscosidade cinemática	[m <sup>2</sup> /s]
$\pi$	Pi	
$\rho$	Densidade do fluido	[Kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma_1$	Obstrução provocada pela espessura da pá na entrada do rotor	[m]
$\sigma_2$	Obstrução devida à espessura da pá na saída	[m]
$\gamma_1$	Coeficiente de contração	[m]
$\gamma_2$	Coeficiente de contração	[m]

## RESUMO

A resistência ao desgaste por abrasão e erosão dos rotores depende das características dos materiais utilizados em sua fabricação, onde a dureza de sua superfície determinará a resistência à penetração dos impactos recebidos. Apesar dos cuidados especiais quanto à escolha do material de fabricação das bombas, o desgaste por abrasão do rotor é praticamente impossível de ser totalmente evitado. Neste trabalho analisa-se o desgaste das pás de rotor de bombas centrífugas, utilizadas em Estação Elevatórias de Água Bruta (EEAB) de rios sedimentares da Amazônia brasileira, decorrente da variação da carga de sedimentos de cota fluviométrica do rio. A análise preliminar do desgaste de dois rotores reais, mostraram uma combinação de impactos diretos na ponta e na base das pás, desgastando o leito por deslizamento, choque direto e erosão por deslizamento em torno da periferia. Neste estudo, analisou-se a capacidade abrasiva dos sedimentos do leito do rio Acre, Brasil, no desgaste de 3 materiais ferrosos diferentes utilizados na fabricação de rotores de bombas centrífugas, utilizados na captação de água bruta. Para determinar o modo de desgaste e a relação do coeficiente de desgaste específico do material ( $K$ ), em função da concentração de sedimentos, foram realizados ensaios em abrasômetro de esfera rotativa em amostras de aço SAE 8620, FoFo nodular e FoFo cinzento, usando como suspensões abrasiva as concentrações de 1, 2, 3, 5 e 10 g/l de sedimento em água destilada. O volume de desgaste em função da velocidade relativa da mistura (água + sedimento) em relação às pás do rotor foi estimado matematicamente. Os resultados mostram que: i) O  $K$  não apresentou diferença significativa em função da variação do  $F_N$  (1, 2 e 3N) durante os ensaios realizados; ii) os ensaios de desgaste mostraram a capacidade abrasiva dos sedimentos em diferentes concentrações; iii) como esperado, o aço SAE 8620 foi mais resistente ao desgaste abrasivo do que as amostras de FoFo cinzento e nodular; iv) a concentração de sedimentos tem efeito importante no comportamento e no coeficiente de desgaste; e v) o controle rotacional da bomba em função da concentração de sedimento e da cota do rio mostrou evidências de redução do desgaste em 30%.

Palavras-chave: desgaste abrasivo, microabrasão, concentração de sedimentos

## **ABSTRACT:**

The abrasion resistance and erosion resistance of the rotors will depend on the characteristics of the materials used in their manufacture, where the hardness of their surface will determine the resistance to penetration of the impacts received. Despite the particular care taken in the choice of pump manufacturing material, abrasive wear of the rotor is practically impossible to completely avoid. This work analyzes the wear of the centrifugal pump rotor blades, used in the Gross Water Infrastructure Station (EEAB) of sedimentary rivers of the Brazilian Amazon, due to the variation of the river sediment load of the river. The preliminary analysis of the wear of two real rotors showed a combination of direct impacts at the tip and at the base of the blades, wearing the bed by sliding, direct shock and erosion by sliding around the periphery. In this study the abrasive capacity of the sediments of the Acre river bed, Brazil, was analyzed in the wear of three different ferrous materials used in the manufacture of centrifugal pump rotors used in the collection of raw water. In order to determine the wear mode and the relationship of the material specific wear coefficient ( $K$ ), as a function of the sediment concentration, a rotating ball abrasometer tests were carried out on SAE 8620 steel, nodular FoFo and gray FoFo, using as abrasive suspensions the concentrations of 1, 2, 3, 5 and 10 g / l of sediment in distilled water. The wear volume as a function of the relative velocity of the mixture (water + sediment) relative to the rotor blades was estimated mathematically. The results show that: i) The  $K$  did not present significant difference as a function of the variation of the FN (1, 2 and 3N) during the tests performed; ii) the wear tests showed the abrasive capacity of the sediments in different concentrations; iii) as expected, SAE 8620 steel was more resistant to abrasive wear than gray and nodular FoFo samples; iv) sediment concentration has an important effect on the behavior and the coefficient of wear; and v) the rotational control of the pump as a function of sediment concentration and river level showed evidence of a 30% reduction in wear.

Key words: abrasive wear, microabrasion, sediment concentration

# 1 INTRODUÇÃO

As Estações Elevatórias de Água Bruta (EEAB), instaladas em rios de água branca da região amazônica, sofrem desgastes do rotor decorrente da grande variação da carga de sedimentos que descem pelos rios ao longo do ano. Esse processo provoca perda de eficiência e comprometimento do funcionamento do equipamento. Na busca para entender esse processo, foi analisada a abrasividade dos sedimentos por meio de ensaios de microabrasão em três ligas metálicas utilizadas na fabricação de rotores de bombas centrífugas destinadas às EEAB. A análise considerou as características das águas do rio Acre, bombeadas pela EEAB da Estação de Tratamento de Água II (ETA II) da cidade de Rio Branco-AC.

A motivação deste trabalho decorre da experiência do autor junto ao Centro de Pesquisas Hidráulicas e Recursos Hídricos (CPH) da Universidade Federal de Minas Gerais, na busca de entender o desgaste dos rotores das EEAB, instaladas em rios de água branca da região amazônica com grande variação da carga de sedimento ao longo do ano. Para tanto, foram realizados ensaios em um abrasômetro de esfera rotativa para determinação da abrasividade dos sedimentos das águas do Rio Acre, bem como a resistência ao desgaste dos 3 materiais utilizados na fabricação de rotores.

Em uma revisão preliminar da literatura, verificou-se que aproximadamente 30% dos sedimentos do rio Acre apresentam granulometria que varia de 30  $\mu\text{m}$  a 45  $\mu\text{m}$ , com concentrações variando entre 38  $\text{mg}/\ell$  a 840  $\text{mg}/\ell$  (CARVALHO *et al.*, 2008). Em trabalho recente realizado por Serrano *et al.* (2016), em que se analisou a granulometria das partículas bombeadas pela EEAB, verificou-se maior concentração de partículas entre 50  $\mu\text{m}$  e 100  $\mu\text{m}$ , devendo tal aumento ser atribuído ao efeito turbulento no bocal de sucção. Em relação ao desgaste, Xing *et al.* (2009) analisaram os sulcos na superfície dos rotores das bombas decorrente do impacto das partículas e identificaram aumento da distorção dos sulcos em função do aumento do diâmetro das partículas.

Apesar dos cuidados especiais quanto à escolha do material de fabricação das bombas, o desgaste por abrasão e erosão do rotor é praticamente impossível de ser evitado totalmente, com reflexos na eficiência da bomba. Como os conjuntos moto-bomba são responsáveis pela maior parte do consumo de energia de uma EEAB, a evolução do desgaste do rotor merece atenção especial, pois uma bomba com rotor desgastado e fora do ponto de operação apresenta perda de rendimento significativo (CONDURÚ & PEREIRA, 2010).

Diante dessas questões, surgiu a necessidade de se estudar com mais atenção, as regiões de maior vulnerabilidade ao referido desgaste, bem como traçar a evolução do mesmo em função da variação da concentração de sedimentos ao longo do tempo, da velocidade de rotação em função da variação da altura manométrica ( $\Delta H$ ) e em função do material utilizado na fabricação dos rotores, cuja intenção é otimizar as rotinas de utilização e manutenção dos conjuntos de bombas de uma estação elevatória de água bruta.



## **2 HIPÓTESE**

Controle rotacional nos conjuntos moto-bomba, em função da carga de sedimentos, pode proporcionar maior vida útil dos rotores de bombas centrífugas utilizadas na captação de água bruta com variação da carga de sedimentos decorrente do regime fluviométrico dos rios de água branca.

## 3 OBJETIVOS

### 3.1 Objetivo geral

Identificar a dinâmica do desgaste dos rotores de bombas centrífugas, utilizadas em estações elevatórias de água bruta de bacias sedimentares da região amazônica, decorrente da variação da concentração de sedimento e da cota fluviométrica do rio.

### 3.2 Objetivos específicos

- Desenvolver uma metodologia para estimar o desgaste abrasivo de rotores de bombas centrífugas utilizadas na captação de água bruta de rios sedimentares.
- Determinar experimentalmente o coeficiente de desgaste em função da concentração de sedimentos de três ligas metálicas utilizadas na fabricação de rotores de bombas centrífugas.
- Comparar a abrasividade do sedimento com o desgaste proporcionado pelo carboneto de silício (abrasivo de referência), nas mesmas condições de ensaio.
- Estimar a evolução do desgaste abrasivo de um rotor de bomba centrífuga em função da variação da rotação da bomba, variação da concentração de sedimento e do regime fluviométrico anual do rio Acre.

## 4 REVISÃO DA LITERATURA

Das diversas formas de utilização da água, o abastecimento humano é o mais importante, ficando a cargo das ETAs a captação e o tratamento. Considerando que os rotores são os componentes mais expostos ao desgaste, evidencia-se necessária atenção aos sistemas de bombeamento das EEAB.

A capacidade de suportar altas rotações e o impacto de sólidos em suspensão são requisitos essenciais para materiais usados na fabricação de rotores de bombas centrífugas. A FIG. 4.1 exibe um exemplo catastrófico dos efeitos de abrasão e erosão no rotor de uma bomba centrífuga.

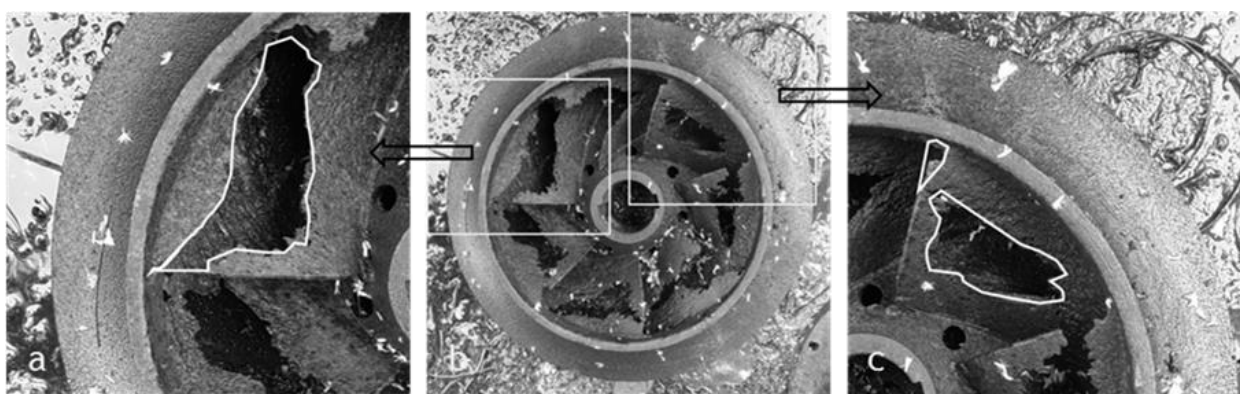


FIGURA 4.1 – Rotor de uma bomba centrífuga com elevado desgastes por abrasão, erosão e corrosão.

FONTE – SERRANO et al., 2016, p. 1

Primeiramente, é importante ressaltar a dificuldade de se encontrar bibliografia diretamente relacionada à erosão e abrasão de rotores por sedimentos em suspensão na água bruta bombeada. Apesar da escassez de trabalhos relacionados a investigações especificamente destinadas ao tema em causa, registra-se que diversos trabalhos correlatos foram encontrados, a partir de pesquisa feita na plataforma virtual *Web of Science*, sistematizados na TAB. 4.1.

Dentre os itens inseridos na pesquisa realizada, destacam-se os 5º, 7º e 9º (TAB. 4.1), que totalizam somente quatro referências, distribuídas assim: registro de patente de um tipo de técnica processamento de um tanque de sedimentação de areia antes da captação das bombas, com o propósito de reduzir os efeitos de abrasão no sistema (WANG *et al.* 2013); outra patente de um técnica de revestimentos de uma bomba destinadas a tanques de sedimentação (ZHU, 2010); um artigo que trata do controle do arrasto de sedimentos em uma estação elevatória por análise numérica (JAYAWARDENA *et al.*, 1999) e; outro artigo referente à previsão de deposição de sedimentos em

reservatórios usando dois modelos dimensionais destinado ao controle de sedimentos que causam a obstrução das entradas na captação e erosão em rotores de bombas (LEE, 2008).

TABELA 4.1

Resumo dos resultados encontrados da pesquisa realizada em 09/05/2016 na Web of Science, sobre erosão e abrasão de rotores por sedimento em suspensão na água bruta bombeada.

Ordem	Web of Science (1945 – 2016)	Mundo	Brasil
1	Só a Palavra <i>pump</i> Nº de trabalhos Data da mais antiga e da mais recente publicação	1.192.358 2016 1945	3.517 2016 1974
2	Só com as palavras <i>pumps</i> e <i>water</i> Nº de trabalhos Data da mais antiga e da mais recente publicação	350.190 2016 1945	523 2016 1988
3	Só com as palavras <i>pumps</i> , <i>water</i> e <i>impeller</i> Nº de trabalhos Data da mais antiga e da mais recente publicação	11.277 2016 1968	7 2013 1996
4	Só com as palavras <i>pumps</i> , <i>water</i> , <i>impeller</i> e <i>abrasion</i> Nº de trabalhos Data da mais antiga e da mais recente publicação	308 2016 1962	0 - -
5	Só com as palavras <i>pumps</i> , <i>water</i> , <i>impeller</i> , <i>abrasion</i> e <i>sediments</i> Nº de trabalhos Data da mais antiga e da mais recente publicação	1 2013 -	0 - -
6	Só com as palavras <i>pumps</i> , <i>water</i> , <i>impeller</i> e <i>erosion</i> Nº de trabalhos Data da mais antiga e da mais recente publicação	66 2016 1981	0 - -
7	Só com as palavras <i>pumps</i> , <i>water</i> , <i>impeller</i> , <i>erosion</i> e <i>sediments</i> Nº de trabalhos Data da mais antiga e da mais recente publicação	3 2010 1999	0 - -
8	Só com as palavras <i>pumps</i> , <i>water</i> , <i>impeller</i> , <i>abrasion</i> e <i>erosion</i> Nº de trabalhos Data da mais antiga e da mais recente publicação	10 2015 2008	0 - -
9	Só com as palavras <i>pumps</i> , <i>water</i> , <i>impeller</i> , <i>abrasion</i> , <i>erosion</i> e <i>sediments</i> Nº de trabalhos Data da mais antiga e da mais recente publicação	0 - -	0 - -

FONTE – Próprio autor

Nota-se que todos os trabalhos que relacionam os sedimentos em suspensão em água bruta com a questão de desgaste por abrasão e erosão de rotores de bombas centrífugas limitam-se à questão de prevenção da entrada desses sedimentos no sistema de captação, deixando vago e/ou não explicando, a evolução desse desgaste em função da variação da concentração de sedimentos decorrente da sazonalidade hidrológica de uma bacia hidrográfica.

Nesse sentido, é importante destacar a fundamentação teórica sobre ciência dos materiais, tribologia, efeitos de hidroabrasão e desgaste por abrasão. Adicionalmente, também será apresentado um histórico do abastecimento de água no Brasil e a caracterização de uma ETA, de uma EEAB.

## 4.1 Ciências e engenharia dos materiais

A Ciência dos materiais tem sido a solução para muitas questões relacionadas à saúde, melhoria de processos e produtos. Segundo Callister (2002), o tema da Ciência dos Materiais envolve investigação das correlações existentes entre estrutura e propriedades de materiais, sendo que, com base na correlação estrutura-propriedade no projeto ou engenharia da estrutura de um material, pode produzir um conjunto pré-determinado de propriedade.

Com base na definição de Callister (2002), é possível inferir sobre a importância da Engenharia de Materiais para a indústria, nos diversos setores da economia. O mesmo autor também divide as propriedades dos materiais em mecânica, elétrica, térmica, magnética, óptica e deteriorativa, sendo que para cada uma dessas propriedades o material apresentará algum tipo de reposta.

Já Askeland *et al.* (2010) considera que a relação entre estrutura, propriedade e processamento determina a função do material e o ciclo de vida esperado para o produto, e que uma mudança na estrutura mudará a propriedade e o processamento (FIG. 4.2).

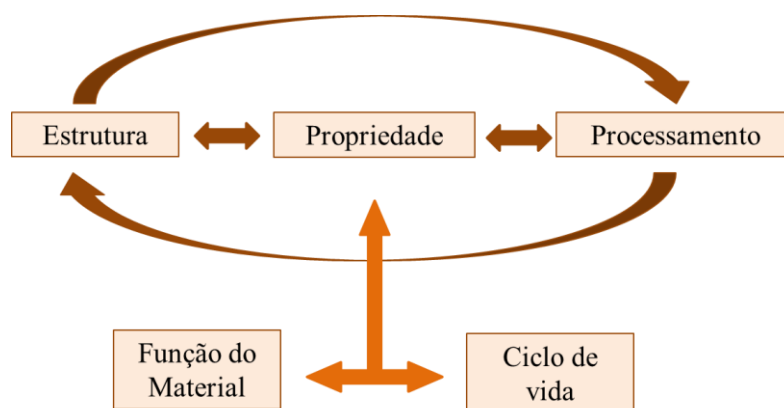


FIGURA 4.2 – Fluxograma da inter-relação entre estrutura, propriedade e processamento.

FONTE – Próprio autor.

Dessa forma, pode-se observar que a engenharia de materiais gera inúmeras oportunidades de se combinar estrutura e propriedades de materiais para novas soluções que possam se traduzir em melhoria de produtos e processos, permitindo a redução de impactos ao meio ambiente e a melhoria da qualidade de vida da humanidade.

#### 4.1.1 Tribologia

Tribologia é a ciência e tecnologia que estuda as interações de superfícies em movimento relativo (HUTCHINGS, 1992). Tal interação deve levar em consideração o atrito, o desgaste e a lubrificação, tendo em vista o interesse econômico, científico e tecnológico em minimizar o desgaste (FIG. 4.3). O desgaste é a principal causa da perda material e do desempenho mecânico, enquanto o atrito é a principal causa do desgaste e da dissipação de energia.

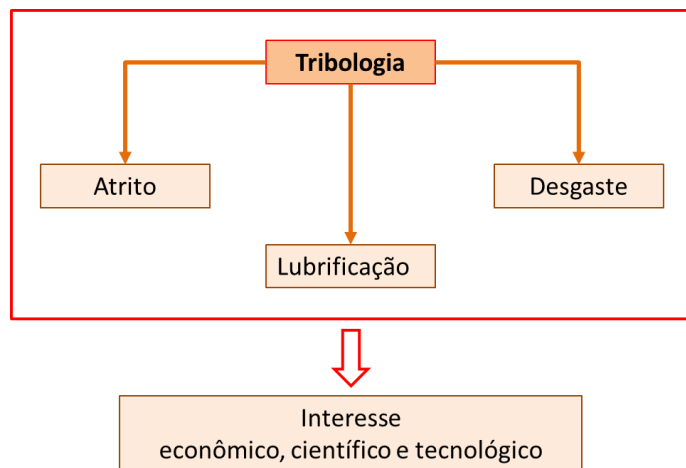


FIGURA 4.3 – Fluxograma da interação do atrito, desgaste e lubrificação no estudo tribológico.

FONTE – Próprio autor.

O atrito e o desgaste dependerão das propriedades da superfície do material e da sua topografia, sendo que, devido à interação das superfícies, estas propriedades podem mudar. Aliado a isso, outro fator importante, são as características do agente abrasivo: o tamanho, morfologia e estrutura das partículas de desgaste que agem na interface entre os materiais. Tais informações são muito importantes para estudar fenômenos de desgaste de superfície (UPADHYAY & KUMARASWAMIDHAS, 2014).

Os fenômenos descritos na TAB. 4.2 afetam a economia, porque os custos causados pelas perdas de energia e de materiais que ocorrem simultaneamente em praticamente todos os dispositivos mecânicos em funcionamento. Esses custos são tão relevantes que a tribologia passou a ser tratada com maior importância pela indústria e governos de vários países, visando a maior eficiência energética. Um engenheiro deverá, por exemplo, evitar as curvas no transporte de material por tubo, pois o desgaste erosivo nas curvas pode ser 50 vezes maior do que em seções retas (SANTOS, 2012).

TABELA 4.2  
Fenômenos tribológicos.

Fenômenos	Características
Atrito	Efeito que provém da existência de forças tangenciais que surgem entre duas superfícies sólidas em contato quando permanecem unidas pela existência de seus esforços normais.
Desgaste	Caracteriza-se pela perda de material da superfície de um corpo como consequência da interação com outro corpo.
Adesão	Capacidade para gerar forças normais entre duas superfícies depois de terem sido mantidas juntas.

FONTE – SANTOS, 2012, p. 29

#### 4.1.2 O atrito

Quando dois corpos se movem de forma tangencial em relação ao outro com que está em contato, uma força é exercida que se opõe ao movimento do corpo, conhecida como atrito.

A palavra "fricção" foi sugerida pela primeira vez por Leonardo da Vinci (1452-1519), sendo descritas as duas primeiras regras por Amontons em 1699. A terceira regra foi descrita por Coulomb em 1785, totalizando três utilizadas atualmente (UPADHYAY & KUMARASWAMIDHAS, 2014) quais sejam:

- A força de atrito é diretamente proporcional à carga normal.
- A força de atrito não depende da área aparente de contato.
- A força de atrito é independente da velocidade.

Após a realização de grandes quantidades de experimentos, demonstrou-se que a força de atrito ( $f_{at}$ ) é proporcional a força normal aplicada ( $F_N$ ), e que a razão entre a força de atrito e a força normal permite calcular o coeficiente de atrito ( $\mu$ ), conforme EQUAÇÃO (4.1):

$$\mu = \frac{f_{at}}{F_N} \quad (4.1)$$

Um contato deslizante afeta o comportamento do atrito (FIG. 4.4), passando por seis fases (UPADHYAY & KUMARASWAMIDHAS, 2014). Na primeira fase (1), o coeficiente de atrito depende do material, propriedades da superfície e das condições ambientais. A força de atrito é

resultado do contato áspero entre superfícies, sem ação do fenômeno de adesão, devido à contaminação por partículas na superfície.

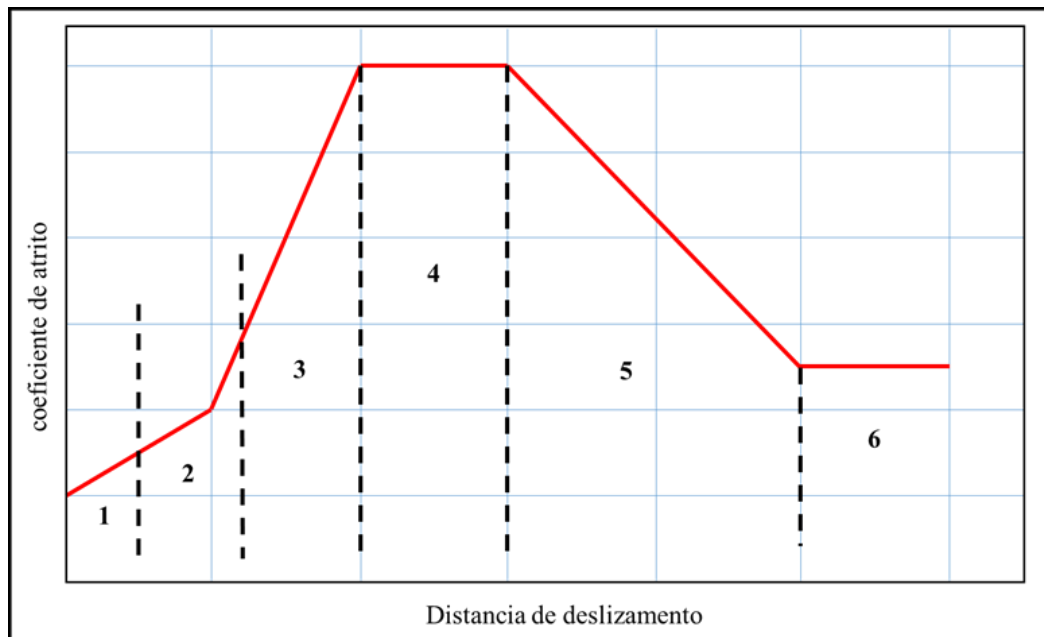


FIGURA 4.4 – Seis fases do mecanismo de fricção que ocorre entre contatos deslizantes na fase inicial.

FONTE – UPADHYAY & KUMARASWAMIDHAS, 2014, p.487

Na segunda fase (2), ocorre um processo de polimento, resultando no aumento do coeficiente de atrito devido ao aumento da adesão. Na terceira etapa (3), as partículas de desgaste, aprisionadas entre as superfícies, considerando que sua dureza é igual ou superior a do material da superfície, vai penetrar esta superfície, impedindo o deslizamento e maximizando o atrito. Na quarta etapa (4), fase de adesão, as partículas aprisionadas entre as superfícies permanecem constantes e a aspereza da deformação continua a contribuir. Na quinta etapa (5), a aspereza de material rígido é removida e cria uma superfície espelhada. A força de atrito diminui por causa da redução da abrasão e deformação. Na sexta etapa (6), ambas as superfícies, mais lisas e duras, adquirem um acabamento espelhado. Os níveis de coeficiente de atrito atingem um nível de abrasividade constante.

#### 4.1.3 Desgaste

De modo geral, o desgaste, segundo a “*American Society of Lubrication Engineers*” (ASLE), é definido como a remoção de material pela ação mecânica. Segundo o Comitê Científico da OECD (*Organization for Economic Cooperation and Development*), é a perda progressiva de material da superfície de uma peça em consequência do movimento relativo de outro corpo sobre a mesma.



Segundo a norma ASTM G40 (2015), o desgaste é a perda progressiva de matéria da superfície de um corpo sólido devido ao contato e movimento relativo com um outro corpo sólido, líquido ou gasoso. Já a norma DIN 50320 (1979) apresenta definição parecida e destaca quatro principais tipos de mecanismos de desgaste que são: desgaste adesivo, desgaste abrasivo, desgaste por fadiga de superfície e desgaste por reação triboquímica (FIG. 4.5), sendo que o desgaste pode ter à ação de mais de um mecanismo, dependendo da condição de contato e da geometria das superfícies.

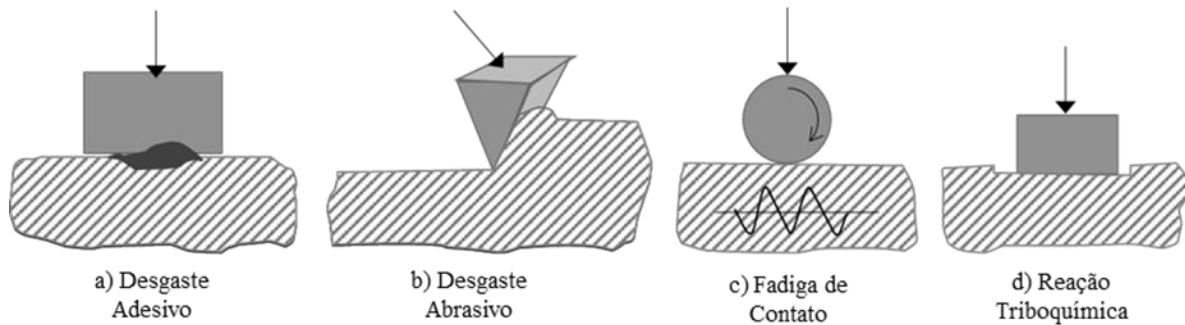


FIGURA 4.5 – Quatro principais mecanismos de desgaste.

FONTE – Adaptado da DIN - 50320, 1979, p. 3

O desgaste adesivo é decorrente do contato de dois materiais que se aderem fortemente, podendo ocasionar danos a uma das superfícies decorrente do deslocamento de um dos materiais. O desgaste abrasivo ocorre quando material mais duro deslizou contra o material mais macio, resultando em um fluxo de matéria plástica do material mais macio. A fadiga de contato ocorre quando uma pressão sobre uma superfície cria uma tensão na zona de contato, ocasionando trincas de tensões cíclicas e aumentando à medida que a pressão aumenta. As reações triboquímicas ocorrem entre as interfaces de superfície, por exemplo, o desgaste por oxidação (HUTCHINGS, 1992).

O volume de desgaste pode ser calculado pela equação dada por Archard & Hirst (1956), em que se verifica que o mesmo é diretamente proporcional à carga normal e à distância de movimento, inversamente proporcional à dureza do material, conforme a EQUAÇÃO (4.2).

$$q = \frac{k}{H_m} \cdot F \cdot S \quad (4.2)$$

Sendo:

$q$  – Volume de material removido ( $\text{mm}^3$ );

$k$  – Coeficiente de desgaste (adimensional);

$H$  – Dureza do material ( $\text{N}/\text{mm}^2$ );

$F$  – Carga aplicada (N);

$s$  – Distância de deslizamento (mm).

O desgaste também pode ser determinado por ensaios em tribossistemas, onde parâmetros como propriedades da superfície, composição química do material, distância de deslizamento, velocidade e carga aplicada, devem ser analisadas para uma melhor compreensão dos mecanismos de desgaste.

#### 4.1.4 Abrasivos

O abrasivo é um conjunto de partículas ou grãos que podem estar presentes na superfície de um segundo material ou podem existir como partículas soltas entre duas superfícies ou livre, podendo causar um rápido e eficiente desgaste conforme mostrado na FIG. 4.6 (ASKELAND *et al.* 2010). Geralmente, para que ocorra o desgaste por abrasão, a dureza do material a ser agredido deverá ser inferior a 0,8 da dureza das partículas (RICHARDSON, 1968).

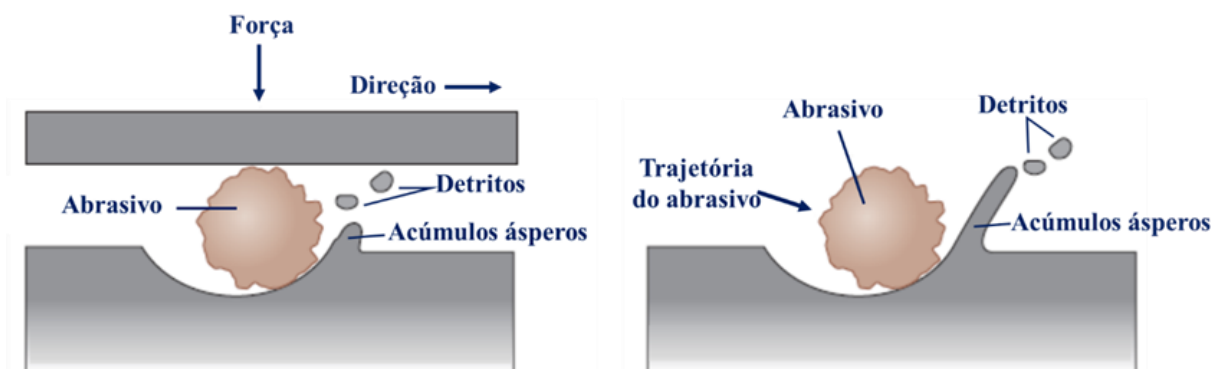


FIGURA 4.6 – O desgaste abrasivo, causado por abrasivos aprisionados ou livres.

FONTE – ASKELAND *et al.*, 2010, p. 880

Os minerais em geral variam consideravelmente na dureza e abrasividade. O quartzo, por exemplo, é comum na forma de areia e frequentemente o causador da abrasão em rotores de bombas e turbinas hidráulicas. Dessa forma, a identificação dos minerais nos grãos que provocam o desgaste por abrasão é um passo importante para o diagnóstico e tratamento deste fenômeno. Por outro lado, os minerais

considerados frágeis para desgastar uma superfície podem causar a fadiga térmica (LARSEN-BASSE, 1973).

Outro fator a ser levado em consideração é a fragilidade do abrasivo. Abrasivos mais duros e resistentes são mais resistentes ao choque e ao rolamento, o que proporciona o polimento de sua superfície reduzindo sua capacidade abrasiva. Os abrasivos duros de resistência moderada, ao quebrarem, apresentam novas faces afiadas e pontas angulares, o que aumenta a intensidade de abrasão, se comparado com o fragmento original. Já os de menor resistência degradam-se rapidamente em partículas mais finas, reduzindo a abrasividade, conforme ilustra a FIG. 4.7 (SWANSON & VETTER, 1985).

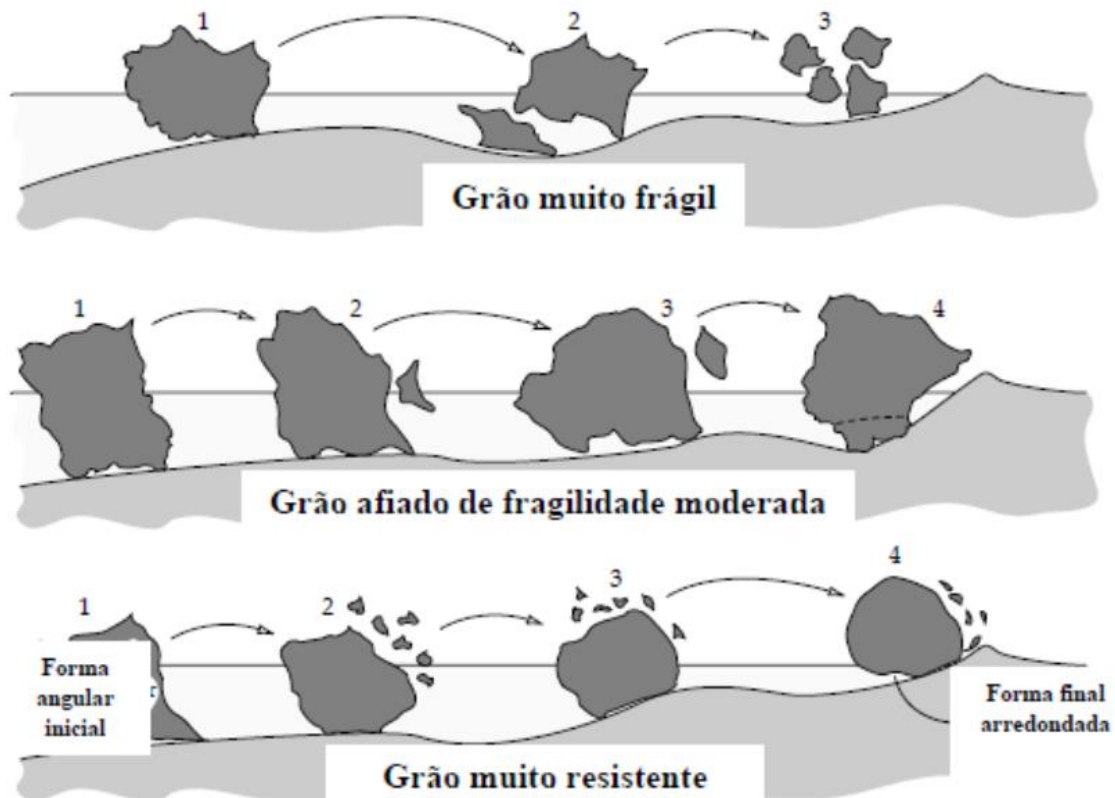


FIGURA 4.7 – Efeito abrasivo da fragilidade e resistência do grão.

FONTE – STACHOWIAK & BATCHELOR, 2007, p. 514

O desgaste causado pela partícula abrasiva vai depender do seu tamanho, forma, dureza, tenacidade, pressões de contato que exercem sobre outra superfície, velocidade de deslizamento, etc. Dessa forma, o tamanho e a geometria de um grão são fatores que influenciam nos mecanismos de desgaste abrasivo, podendo ser definido como o tamanho mínimo de uma esfera que envolve toda a partícula e que pode ser medido por peneiramento da amostra mineral através de furos de um diâmetro

conhecido (STACHOWIAK & BATCHELOR, 2007). Além disso, é importante conhecer a geometria do grão, tendo em vista que ensaios laboratoriais mostram que o aumento de angularidade dessas partículas resulta no aumento significativo das taxas de desgastes abrasivo ou erosivo (STACHOWIAK\* & STACHOWIAK, 2001)

#### 4.1.5 Distribuição de tamanhos das partículas

A distribuição de tamanhos de partículas determina a quantidade de partículas sólidas em cada faixa de tamanho, que normalmente é dada em fração mássica ou volumétrica em função dos diferentes diâmetros de partícula encontrados em uma amostra. Essa distribuição é importante para caracterizar as propriedades de materiais particulados como pós, suspensões, emulsões, etc. quanto a sua abrasividade, aglomeração, grau de dispersão, deposição, fluidez, granulação, permeabilidade, sedimentação, turbidez, entre outras características (ARTUZO, 2014)

Além disso, conhecer a distribuição do tamanho das partículas, influência nos fenômenos de transferência de massa, adsorção, difusão e reações bioquímicas, de modo que o emprego da análise de tamanho de partículas pode auxiliar na escolha e no aprimoramento de tecnologias de tratamento e na adoção de procedimentos operacionais apropriados (SANTOS *et al.* 2004).

Há inúmeras maneiras de se representar o tamanho de uma partícula. Uma vez que a esfera possui o formato que pode ser representado por um único número, relacionam-se as dimensões da partícula aos diâmetros de esferas de diferentes tamanhos (SANTOS *et al.*, 2004). Assim, as propriedades de uma partícula podem ser expressas em termos do diâmetro da esfera equivalente de mesma área superficial, mesmo volume, mesma massa, etc., como pode ser observado na FIG. 4.8.

Cada técnica de determinação da distribuição de tamanho de partículas relaciona uma das propriedades destas a um valor de diâmetro (esfera equivalente). Como cada técnica fornece resultados distintos para uma aplicação específica, comparações entre elas não devem ser realizadas indiscriminadamente.

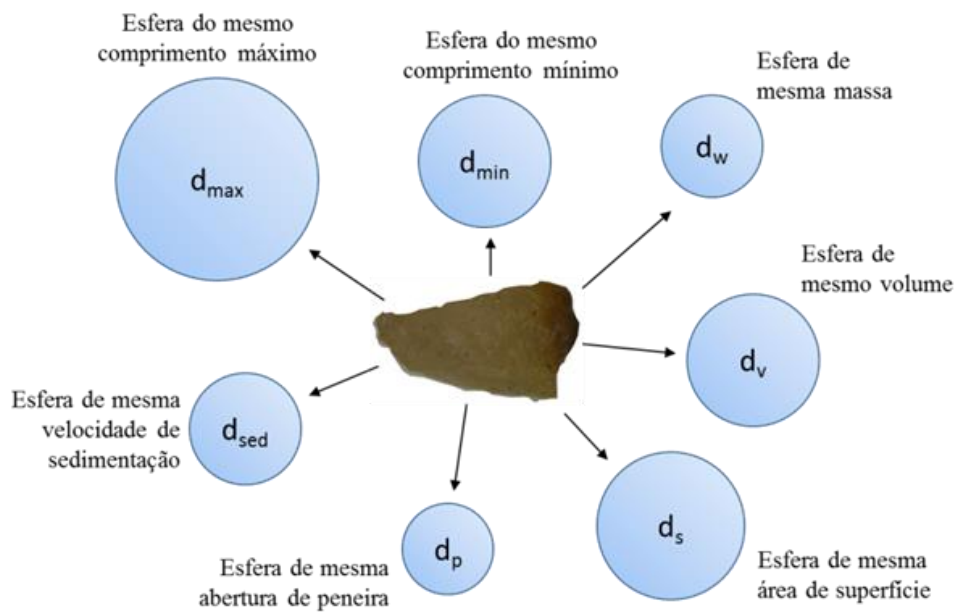


FIGURA 4.8 – Diâmetros equivalentes de uma partícula.

FONTE – Adaptado de SANTOS et al., 2004, p. 293

Santos *et al.* (2004) apresentam um resumo simples das principais técnicas de determinação de tamanho de partículas, suas descrições, a esfera equivalente associada e as principais vantagens e desvantagens de sua utilização. Já no presente estudo será utilizada apenas a técnica Granulometria por Sedimentação disposta na NBR 7181 (ABNT, 1984).

#### 4.1.6 Desgaste erosivo

O desgaste erosivo ocorre quando partículas em um fluido deslizam a uma velocidade relativamente alta, contra uma superfície. Cada partícula que entra em contato com a superfície corta uma pequena partícula da superfície onde entrou em contato. Individualmente, cada partícula removida é insignificante, mas um grande número de partículas removidas durante um longo período de tempo pode acarretar diferentes graus de erosão (ASTM G40, 2015). O desgaste erosivo pode ser esperado em bombas e impulsores, ventiladores, linhas de vapor e bocais, no interior de curvas acentuadas em tubos e tubulações e áreas semelhantes onde existe um movimento relativo considerável entre o metal e as partículas.

A erosão é um termo bastante amplo e pode ser ainda classificado em um número de termos mais específicos:

- Erosão de cavitação - devido à formação e colapso de bolhas de vapor ou gás dentro da voluta;
- Erosão de impacto líquido - devido a impactos por gotas ou jatos líquidos sobre a superfície erodida;
- Erosão de partículas sólidas – devido a impactos de partículas solidas sobre a superfície erodida.

As características do material exercem um forte efeito sobre o desgaste erosivo, mas nem sempre a melhora das qualidades mecânicas resulta em uma melhora na resistência ao desgaste (ARTUZO, 2014).

O desgaste erosivo não se refere a um número específico de mecanismos de desgaste que acontece quando as partículas relativamente pequenas colidem contra componentes mecânicos. Esta definição é de natureza empírica, que aponta considerações mais práticas do que qualquer entendimento fundamental de desgaste (ARTUZO, 2014).

O ângulo de impacto é o ângulo entre a superfície desgastada e a trajetória das partículas, imediatamente antes do impacto, contra a superfície, podendo variar de  $0^\circ$  a  $90^\circ$  (FIG. 4.9). O baixo ângulo de impacto favorece o processo de desgaste, similar ao desgaste abrasivo, pois as partículas tendem a se arrastar sobre a superfície após o impacto.

O alto ângulo de impacto favorece mecanismos de desgaste que são característicos da erosão. Quando ocorre alta taxa de erosão e baixo ângulo de impacto, prevalece o desgaste por fratura dúctil. Caso a taxa máxima seja encontrada para altos ângulos de impacto, o desgaste frágil predomina (STACHOWIAK & BATCHELOR, 2007).

A velocidade da partícula erosiva influencia muito no processo de desgaste, de tal modo que se a velocidade for baixa a tensão do impacto não é suficiente para causar deformação plástica, então o desgaste ocorre por fadiga da superfície. Quando a velocidade aumenta, a erosão da superfície acontece por deformação plástica com o impacto da partícula. Este fato é comum em processos de engenharia, o desgaste pode ocorrer por repetitivas deformações plásticas (STACHOWIAK & BATCHELOR, 2007; YUST & CROUSE, 1978).

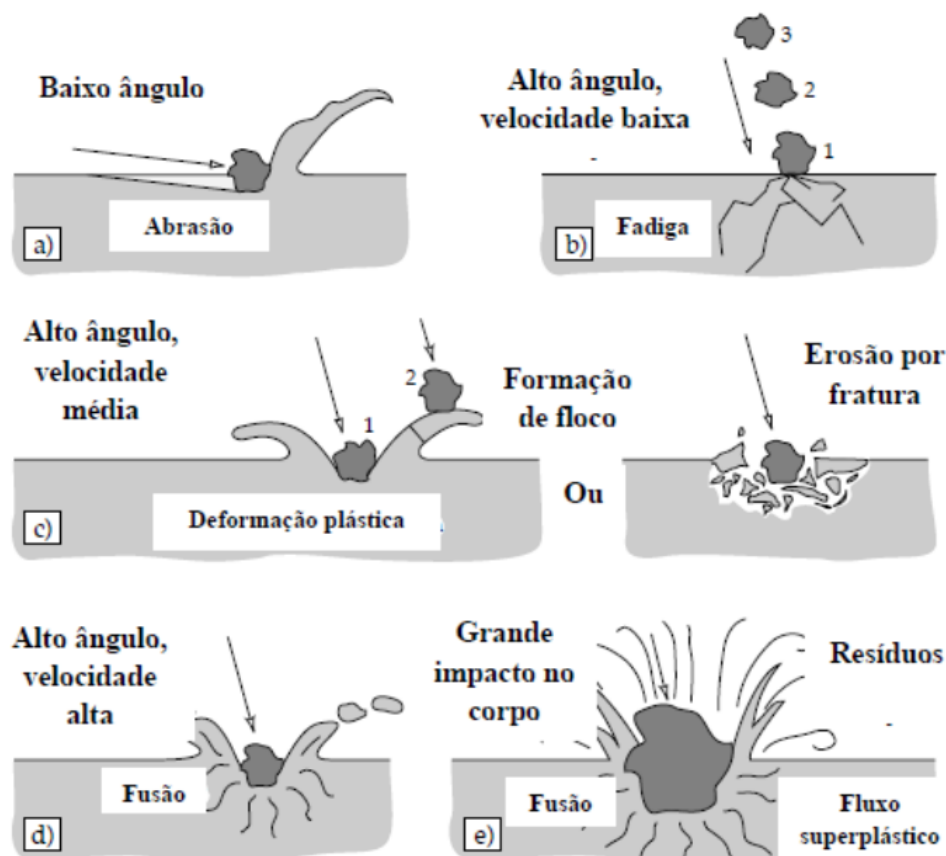


FIGURA 4.9 – Possíveis mecanismos de desgaste erosivo: a) abrasão a baixo ângulo de impacto; b) fadiga da superfície a velocidade baixa e alto ângulo de impacto; c) fratura frágil ou múltiplas deformações plásticas durante impacto a médias velocidades e alto ângulo.

FONTE – STACHOWIAK & BATCHELOR, 2007, p. 528

Quando as partículas que causam a erosão estiverem cegas ou em forma esférica, formam-se camadas finas na superfície desgastada por causa da deformação plástica. Ao contrário, quando as partículas estão afiadas, o corte ou a fratura frágil são mais comuns. Os materiais frágeis se desgastam por causa das trincas que se formam abaixo da superfície e quando a velocidade da partícula for alta, poderá até fundir durante o impacto contra a superfície (STACHOWIAK & BATCHELOR, 2007; YUST & CROUSE, 1978).

O tamanho da partícula deverá ser considerado, destacando-se que tamanhos na faixa de  $5\mu\text{m}$  a  $500\mu\text{m}$  causam o desgaste erosivo, mas não significa que esta faixa de tamanhos seja referência, pois partículas minúsculas também causam desgaste erosivo (GARTON *et al*, 1986; STACHOWIAK & BATCHELOR, 2007).

#### 4.1.7 Desgaste por abrasão e erosão

O desgaste por abrasão ocorre quando as partículas duras são forçadas contra ou se movem em relação a uma superfície sólida, onde as partículas maiores são cortadas na região de cisalhamento, resultando em fragmentos posteriormente moídos no descolar da superfície sólida, conforme apresentado na FIG. 4.10 (WARMAN, 2009).

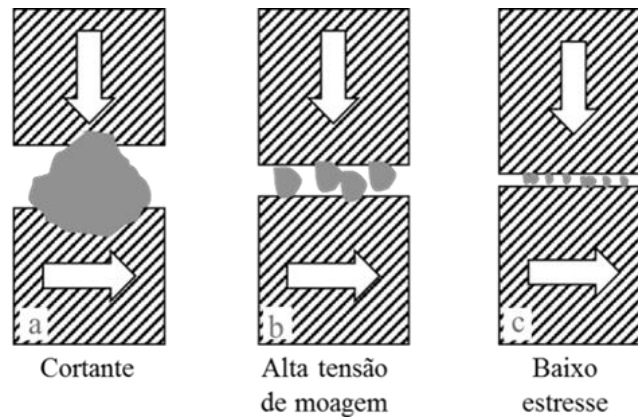


FIGURA 4.10 – Três principais modos de desgaste

FONTE – WARMAN, 2009, p.11

Em uma bomba centrífuga, a abrasão ocorre entre o rotor e o manto estacionário da carcaça e entre o eixo e o invólucro estacionário (WARMAN, 2009). Outro fator responsável pelo desgaste do rotor é a erosão, que envolve a perda de material da superfície do rotor e da carcaça pela ação das partículas arrastadas pelo fluido. Nesse processo, a energia cinética é transferida para as partículas, que por ter formas irregulares, apresentam alta tensão de contato específico, conforme pode ser visualizado nas FIG. 4.10 e 4.11.

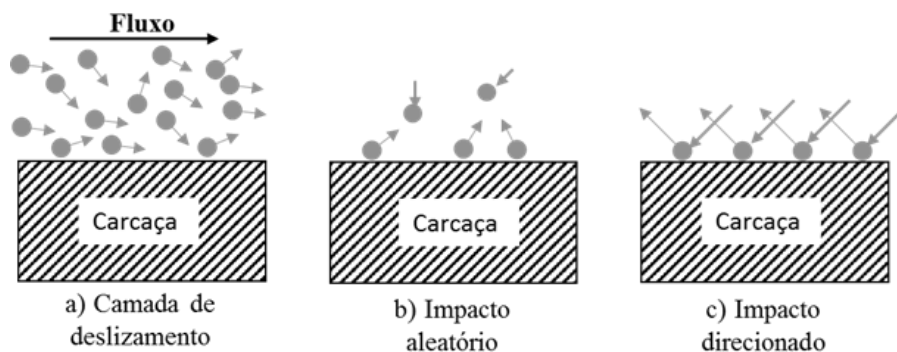


FIGURA 4.11 – Três principais modos de desgaste erosivo

FONTE – WARMAN, 2009, p.12



Em relação à localização do desgaste no rotor, Xing *et al.* (2009) analisaram os processos de desgaste em bombas, simulando os componentes baseados na teoria da geometria não linear dos materiais e identificaram o seguinte: a existência de sulcos na superfície dos componentes decorrente do impacto de partículas; o aumento da distorção dos sulcos em função do aumento do diâmetro da partícula; velocidade de impacto e ângulo de colisão.

No mesmo sentido, Pagalthivarthi & Visintainer (2009), usando um modelo de elemento finitos, obtiveram analiticamente as taxas de desgaste por meio de coeficientes determinados empiricamente, identificando a taxa de desgaste ao longo da superfície da carcaça e os locais de maior velocidade de erosão. Nesse mesmo trabalho, os autores identificaram que o maior índice de erosão ocorre na região de cisalhamento de forma não uniforme, sendo mais significativo nas extremidades das pás. Tian *et al.* (2005) identificaram tais desgastes e propuseram um modelo numérico, em que os desgastes foram determinados para diferentes proporções de mistura e tamanho das partículas, chegando à conclusão que a forma das partículas e sua distribuição promovem efeitos significativos sobre os valores do coeficiente de desgaste e apresentam forte correlação com a dureza dos materiais empregados nos ensaios.

Já Maio *et al.* (2012) basearam-se em informações do desgaste com a presença de sólidos suspensos e, a partir de análises estatísticas, concluíram que o aumento da vibração, provocado pela alteração do peso dos elementos estruturais da bomba, decorrente da erosão ocasionada pela abrasão dos sedimentos, pode indicar a evolução do desgaste da mesma.

De modo geral, a maioria das pesquisas relacionadas ao desgaste foi desenvolvida por ensaios laboratoriais utilizando-se rodas giratórias ou esfera rotativa sobre a superfície a ser analisada. E diversos pesquisadores na área de tribologia concordam que o desgaste abrasivo de um material com coeficiente de desgaste ( $k$ ) pode ser calculado usando-se a equação geral de fenômenos abrasivos de Archard & Hirst (1956), EQUAÇÃO (4.2), página (RUTHERFORD *et al.* 1997; ALLSOPP & HUTCHINGS, 2001; COZZA *et al.*, 2015; SANTOS *et al.*, 2015; KRELLING *et al.*, 2017).

## **4.2 Mecanismos de hidro-abrasão**

Conforme já observado por Duan (1998), o desgaste superficial decorrente a ação da água, pode surgir como resultado de fricção que ocorre entre a corrente de água contínua e a superfície dos elementos

imersos, bem como devido ao efeito de impacto exercido pelo fluxo de água na superfície, decorrendo um processo puramente mecânico.

No momento da colisão, a energia cinética de uma partícula em movimento é convertida em trabalho, deformando o material dos componentes hidráulicos. Durante as deformações residuais, certa parte volumétrica da camada superficial separa-se, deixando marcas de rugosidade que variam em função do material utilizados na fabricação dos componentes.

No caso de superfícies metálicas dos rotores, ocorre a formação de microcortes decorrentes dos múltiplos encontros que ocorrem entre as partículas abrasivas e a superfície, dessa forma, ficando evidente que a intensidade do desgaste da superfície depende principalmente da energia cinética das partículas transportadas pelo fluxo, ou seja, da sua massa e velocidade de deslocamento relativo à superfície de impacto e também, da concentração de partículas abrasivas do fluido.

#### 4.2.1 Sedimento

A dureza das partículas dos sedimentos suspensas no fluxo hidráulico é de grande importância. Conforme relatado por Duan & Karelin (2002), as partículas com dureza maior que a dos materiais utilizados na fabricação dos componentes hidráulicos (dureza Moh  $\geq 5$ ), podem proporcionar desgaste por riscamento. Segundo os mesmos autores, as partículas de menor dureza podem proporcionar erosão por fadiga e a transição de um padrão para o outro pode ser definida pela EQUAÇÃO (4.3).

$$K_{rd} = \frac{H_m}{H_{dp}} \quad (4.3)$$

Sendo:

$K_{rd}$  – Razão de dureza;

$H_m$  – Dureza do material;

$H_{dp}$  – Dureza da partícula abrasiva

Quando  $K_{rd} < 0,6$ , a interrupção do desgaste é direta e quando o  $K_{rd} > 0,6$  há transição evidente para erosão por fadiga multicíclica.

Por isso, é importante conhecer a composição mineralógica de sua matéria sedimentar definida pela estrutura geológica do rio, para poder avaliar a intensidade da erosão em máquinas hidráulicas. A TAB. 4.3 pode ser utilizada para avaliações comparativas das intensidades de abrasão hidráulica.

TABELA 4.3  
Comparação da dureza Moh's com a intendida da abrasão hidráulica.

Classe de abrasividade	Rock's especificação de acordo com a abrasividade	Medida abrasiva (mg)	Rochas típicas que formam as classes
1	Abrasividade super-baixa	Abaixo de 5	Calcário, mármore, sulfetos suaves, apatita, halita, xistos
2	Abrasividade Baixa	5 a 10	Minérios de sulfureto e sulfito de barite, argilitas, ardósias macias
3	Abrasividade média I	10 a 18	Jaspilites, hornstones, rochas magnéticas de lamelas finas, minérios de ferro
4	Abrasividade média II	18 a 30	Arenitos de quartzo e arkose de grão fino, diabases, piritas de grãos grosseiros, quartzo de veia, calcários de quartzo
5	Abrasividade média III	30 a 45	Arenitos de quartzo e arkose de grãos médios e grosseiros, gnaisses de grão fino, porphyrites, gabbro, gneisses
6	Abrasividade média IV	45 a 65	Granitos, diorites, porphyrites, syenites de nefelina, piroxenitos, ardósias de quartzo
7	Abrasividade alta	65 a 90	Porfírica, diorita, granito
8	Abrasividade super alta	Acima de 90	corundum formado de rochas

FONTE – DUAN & KARELIN, 2002, p.12

Dessa forma, é possível correlacionar os efeitos abrasivos decorrente de cada tipo de material sedimentar, permitindo avaliações comparativas da abrasão hidráulica, levando em consideração a composição mineralógica em suspensão na água bombeada.

#### 4.2.2 Efeito abrasivo em bombas

Duan & Karelin (2002), ao analisar as condições das plantas de bombeamento de Azerbaijan, que bombeavam água com cargas de sedimentos acima de 2,5 kg/m<sup>3</sup> (>0,25%), verificaram que o desgaste dos rotores ocorreu não apenas por cavitação, mas também por hidroabrasão. Observaram também, que as regiões periféricas foram mais afetadas, com sulcos mais profundos, e que os rotores em aço carbono foram significativamente desgastados após 1 a 1,5 anos de operação.

Outro exemplo de desgaste por erosão também foi encontrado em um grande sistema de irrigação localizado no rio Kure, que funciona 6 meses do ano. Os rotores dessas bombas precisam ser substituídos a cada 6 a 9 meses de utilização. Durante inspeção visual, Duan & Karelin (2002), identificaram que as marcas de desgaste causado pela erosão abrasiva apresentam formas que se assemelham a sulcos de grande porte com superfície lisa, com os bordos de fuga das pás do rotor entalhadas pelo efeito erosivo.

#### 4.2.3 Efeito técnico e econômico causado pela erosão dos rotores de bombas.

A eficiência de um sistema de bombeamento pode ser alterada em função da alteração do desempenho e das alterações operacionais, proporcionando um aumento relativo das perdas hidráulicas independente da fricção (DUAN & KARELIN, 2002). Em primeiro lugar, a perda hidráulica aumenta devido ao desvio do padrão do fluxo da mistura e saída nominal da mistura (água + sedimento) do rotor. As alterações de fluxo causadas pela alteração do perfil das pás do rotor decorrente do desgaste abrasivo, proporcionam perdas volumétricas e mecânicas (DUAN & KARELIN, 2002).

Os mesmos autores também relatam que o aumento da rugosidade ocasionada especificamente pela erosão da superfície das pás do rotor leva ao aumento da perda hidráulica, enquanto que o desgaste das arestas dianteiras e do bordo de fuga das pás desviam as linhas de fluxo do parâmetro de projeto, levando a uma queda aguda da eficiência da bomba. Além disso, o desgaste do rotor ocorre de forma irregular, causando desequilíbrio e destruição dos rolamentos, decorrente do aumento da vibração mecânica do sistema.

A FIG. 4.12, apresentada a seguir, é um exemplo que ilustra a piora do desempenho de uma bomba da V.V. Kuibyshev Moscow Civil Engineering Institute (MIEI); os ensaios foram realizados para determinar a qualidade de energia da bomba que opera em córregos de água que contêm uma grande quantidade de matéria sedimentar. A diminuição da eficiência da bomba fortemente desgastada, em comparação com a eficiência de uma bomba reparada, equivale a 12% a 15% para bomba centrífuga (DUAN & KARELIN, 2002).

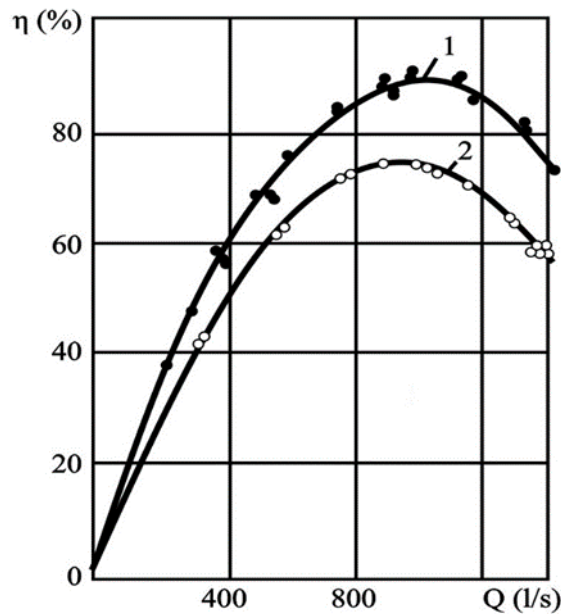


FIGURA 4.12 – Redução do desempenho causado pela desgaste do rotor de uma bomba centrífuga (1) rotor novo e (2) rotor desgastado

FONTE – DUAN & KARELIN, 2002, p. 46

Nota-se que o declínio no desempenho, devido ao processo de erosão não ocorre imediatamente, porém a intensidade aumenta ao longo do tempo. Em relação a eficiência energética, também foi observado uma diminuição de 6% - 7% (DUAN & KARELIN, 2002).

Em relação ao efeito da densidade do sedimento, Duan & Karelin (2002) também observaram que as concentrações inferiores  $10 \text{ kg/m}^3$  (1%), com diâmetros das partículas inferiores a 0,27 mm, a densidade do sedimento não proporciona efeito expressivo sobre o desempenho hidráulico.

### 4.3 Sistema de bombeamento de uma EEAB.

De modo geral, atribui-se o termo bomba a todo equipamento capaz de transferir para um fluido a energia de uma determinada fonte, de modo que esse fluido possa realizar determinado trabalho. Já a estação elevatória é um conjunto de bombas e acessórios, responsáveis pelo trabalho de deslocar um volume de água, por tubulações, de um ponto mais baixo para outro mais alto.

As elevatórias podem estar localizadas antes, dentro ou depois da estação de tratamento de água, podendo ser elevatórias de água bruta ou tratada. A preocupação com os sistemas de transporte e

elevação de água remontam à época das primeiras iniciativas humanas de aglomeração, cuja sobrevivência em sociedade dependia da disponibilidade de água (CARVALHO, 2010).

O aumento da necessidade de água para o consumo humano, agricultura, criação de animais, indústria e etc. tornou necessário o desenvolvimento de tecnologias de bombeamento de água. Uma das mais antigas que se tem registro é a bomba a pistão desenvolvida pelo filósofo grego Ctesibius (270 a.C.). Mais recentemente, o avanço tecnológico permitiu a construção de motores elétricos de alta rotação que possibilitaram a construção de bombas centrífugas capazes de atender as necessidades de bombeamento de água e outros fluidos (CARVALHO, 2010).

Um sistema de bombeamento de água apresenta vários componentes, com arranjos direcionados a cada necessidade, mas, em sua maioria, são constituídos de captação, elevatória e adutoras de recalque.

Logo após a captação têm-se as estações elevatórias, cuja finalidade é fornecer energia potencial à água, de modo a proporcionar o deslocamento do fluido de um ponto a outro. Normalmente, essa energia potencial é fornecida por meio de uma bomba hidráulica, mediante a transformação de trabalho mecânico em energia, a qual é transmitida ao fluido sob a forma de energia de pressão e cinética (MACINTRYRE, 2013).

Neste trabalho, abordar-se-á sobre as bombas centrífugas, que são amplamente empregadas em sistemas de bombeamento de água bruta. Essas bombas normalmente são dotadas de grandes rotores, com a finalidade transmitir aceleração à massa fluida, fazendo com que esta adquira energia cinética a partir da energia mecânica. Esses rotores (FIG. 4.13), descritos de forma simplificada, são um disco giratório dotado de pás, cuja geometria depende do tipo de bomba e do desempenho hidráulico requerido para impulsionar o fluido, podendo ser classificados como:

- Rotor fechado – além do disco no qual se fixam as pás, é também dotado de uma coroa circular. O escoamento se dá por entre as pás e a coroa, sendo esse tipo mais empregado para líquidos sem substâncias em suspensão;
- Rotor aberto – não dispõe de coroa circular e é mais empregado para líquidos contendo pastas, lamas, areias, esgotos sanitários.
- Rotor semiaberto – Apresenta apenas um disco de fixação das pás.



FIGURA 4.13 – Classificação de rotores de bombas centrífugas  
FONTE – BRASIL, 2010, p.78

A água, ao passar pelo rotor, recebe parte da energia cinética gerada pela rotação do mesmo, transformando-a em energia de pressão, fazendo com que ocorra uma elevação da velocidade do fluido, de forma a conseguir superar a pressão que se opõe ao seu deslocamento. Desse modo, ao atingir a boca de saída da bomba, o líquido é capaz de escoar com velocidade razoável, equilibrando a pressão que se opõe ao seu escoamento, conforme o teorema de Bernoulli (BRASIL, 2010; RESENDE, 2014).

Assim que se inicia o movimento rotativo do rotor e do líquido contido em suas pás, a força centrífuga decorrente desse movimento cria uma zona de maior pressão na periferia do rotor e outra de baixa pressão em sua entrada, induzindo o deslocamento do fluido em direção à saída dos canais formados pelas pás, forçando a saída da água pelo coletor e difusores de fluxo, onde é feita a transformação da maior parte da elevada energia cinética do líquido, em energia de pressão na saída da bomba, em direção à coluna de recalque (FIG. 4.14). Em virtude desse diferencial de pressões no interior da bomba, cria-se um gradiente hidráulico entre a entrada e a saída da bomba, cuja magnitude é função de sua rotação, da geometria do rotor e da carcaça da bomba (BRASIL, 2010; RESENDE, 2014).

Dessa forma, a quantidade de energia a ser fornecida ao fluido ao passar por uma bomba é função do trabalho necessário para deslocar o peso do fluido entre duas posições quaisquer, acrescido das resistências ao longo do percurso a ser percorrido desde sua origem até seu destino (RESENDE, 2014).

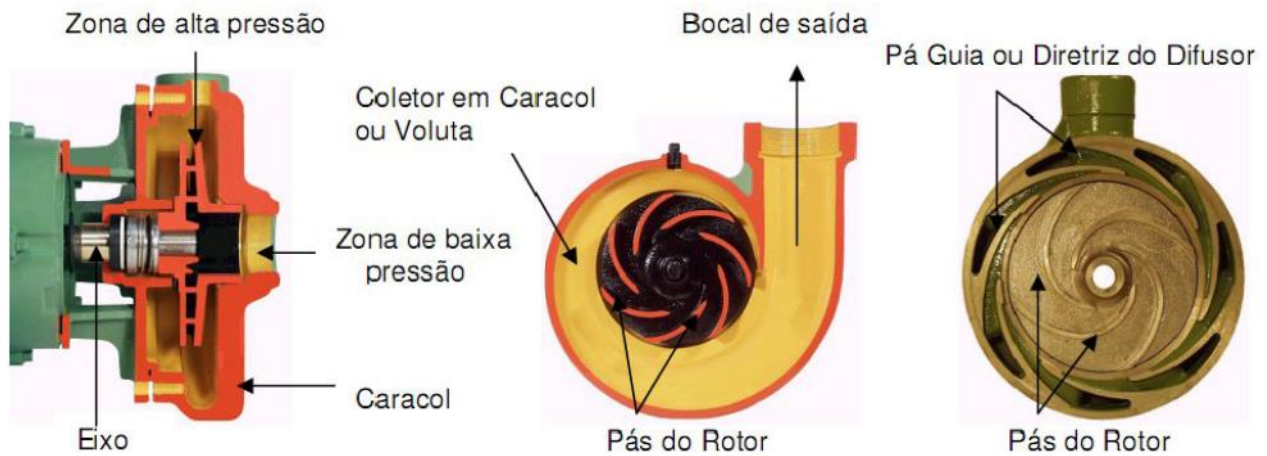


FIGURA 4.14 – Vista em corte: Bomba centrífuga em voluta caracol

FONTE – BRASIL, 2010, p.78

Dentre as diversas formas de acionamento de uma bomba centrífuga, o uso de motores elétricos são os meios utilizados, em virtude de apresentarem baixo custo de manutenção e maior segurança operacional (CARVALHO, 2010).

A chamada linha de sucção é o trecho de tubulação que se posiciona entre o ponto de captação e o bocal de sucção da bomba. Para o caso típico, é composta de válvula de pé com crivo, tubulação de sucção, curva de 90° e redução excêntrica. A válvula de pé, permite a passagem do fluido somente na direção ascendente, mantendo a bomba e a linha de sucção sempre cheia com o fluido recalcado, realizando a escorva de forma que ao dar partida no motor de acionamento, não ocorra a aspiração de ar, o que impedirá a impulsão do fluido (RESENDE, 2014).

O crivo tem a função de reter impurezas e sólidos que possam ser sugados e vir a prejudicar o funcionamento da bomba. Seu posicionamento deve ser feito de forma a evitar que o ponto de entrada do fluido na tubulação de sucção esteja sempre submerso, de forma a evitar que a bomba venha a aspirar ar, fato que pode prejudicar sua eficiência e, até mesmo, impedir o bombeamento do fluido (RESENDE, 2014).

Considerando que a velocidade de escoamento influencia na perda de energia por atrito ao longo das tubulações de sucção e recalque, recomenda-se o emprego de diâmetros maiores do que os diâmetros dos bocais de entrada e de saída da bomba. A escolha da velocidade de escoamento nas tubulações está associada a fatores econômicos, sobretudo no caso de longas adutoras de recalque, considerando



também fatores como a viscosidade do fluido e a presença de substâncias ou partículas em suspensão (RESENDE, 2014).

A de recalque é o trecho de tubulação que vai desde o bocal de saída da bomba até o ponto de destino do fluido e inclui os dispositivos hidráulicos, como a ampliação gradual, destinada a adaptar o diâmetro da tubulação ao diâmetro do bocal de saída da bomba e válvulas de retenção e de gaveta, destinadas a evitar o retorno da coluna de líquido contida na tubulação de recalque para o ponto de captação, e ao controle da vazão escoada ou ainda o bloqueio da tubulação em caso de parada do motor ou retirada da bomba para manutenção, respectivamente (RESENDE, 2014).

As propriedades de uma bomba são usualmente expressas por meio de suas curvas características, as quais correlacionam as grandezas: vazão ( $Q$ ), energia total fornecida ou altura manométrica ( $H$ ), rendimento ( $\eta$ ), rotação ( $n$ ) e potência de acionamento ( $N$ ) (MACINTYRE, 2013; MATAIX, 2009; RESENDE, 2014).

O maior interesse ao se selecionar uma bomba para uma determinada aplicação é de se conhecer a variação de  $Q$  em função de  $H$ , expressa na curva da bomba. Sobre essa relação aplica-se a curva do sistema, a qual expressa a energia requerida pelo sistema em função da vazão, determinada pelas perdas de energia ao longo das linhas de sucção e de recalque, como também no interior da bomba, por atrito e por turbulência, além do desnível geométrico e do diferencial de pressão, quando houver, entre os pontos de origem e destino do fluido bombeado (RESENDE, 2014).

A influência das perdas ocorridas no interior da bomba sobre a variação da energia total fornecida, ou altura manométrica, faz com que a curva da bomba apresente um decaimento parabólico, já que é função da parcela atribuída à energia cinética ( $v^2/2g$ ), proporcionando uma relação não linear (RESENDE, 2014).

Já no caso da curva do sistema, observa-se o mesmo efeito ao se computar as perdas decorrentes de atritos e turbulências ao longo das linhas de sucção e recalque. Tal como esquematizado nas curvas apresentadas na GRA. 4.1, o ponto de operação, que representa a condição de funcionamento de uma elevatória sob determinadas condições de trabalho, se desloca no sentido de 1 para 3, na medida em que a perda de energia, ou perda de carga, diminui ao longo do sistema (RESENDE, 2104).

Da mesma forma, o desgaste do rotor pode diminuir a eficiência da bomba, declinando a curva da bomba no sentido de (a) para (c), e se considerarmos o desgaste do rotor e o aumento da perda por atrito e turbulência do sistema, tem-se um deslocamento do ponto de operação de 3a para 1c, conforme demonstrado da GRA. 4.1.

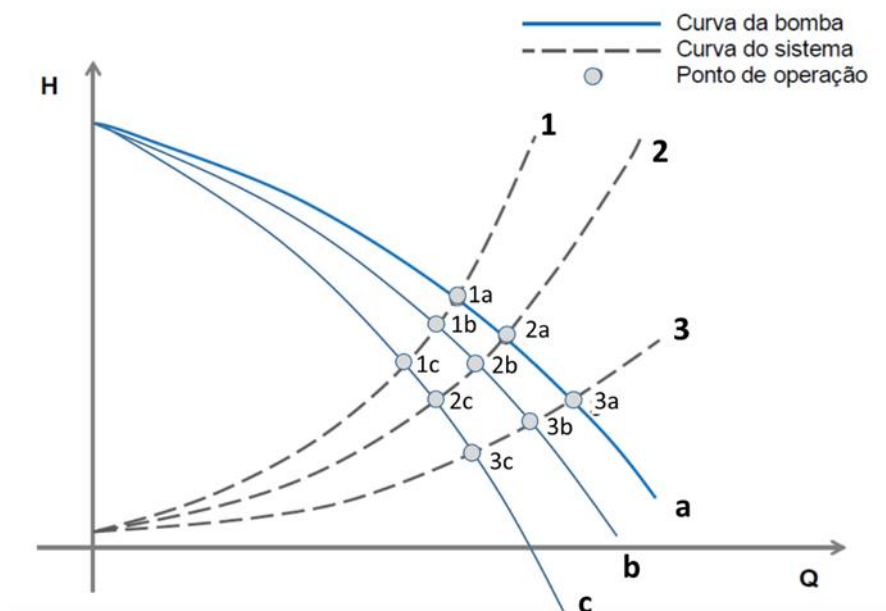


GRÁFICO 4.1 – Curva de desempenho e influência do desgaste no ponto de operação.

FONTE - adaptado de RESENDE, 2014, p.48

Conforme foi sugerido por Resende (2014), é esperado um deslocamento do ponto de operação da bomba ao se sobreporem suas curvas características com as curvas do sistema, em decorrência de desgaste normal de seus constituintes e do aumento da aspereza interna das tubulações, da deposição e incrustação de partículas sólidas presentes no fluido ou até mesmo da alteração de suas características, como a temperatura, densidade e viscosidade.

As bombas são usadas para adicionar energia ao sistema hidráulico, de tal modo que os fluidos possam superar as diferenças de elevação, as perdas por atrito localizadas e distribuídas. A discussão dessa tese é orientada para bombas centrífugas, porque são as bombas frequentemente utilizadas em estações elevatórias de água bruta. Informações adicionais sobre as bombas podem ser encontrados em Macintyre (2013) e Mataix (2009).

#### 4.4 Eficiência energética no sistema de bombeamento.

A racionalização do uso da energia está diretamente vinculada à eficiência dos sistemas e equipamentos utilizados nas atividades desenvolvidas. Ao uso racional de energia, que compreende as ações ou medidas comportamentais, tecnológicas e econômicas dá-se o nome de eficiência energética. No contexto da conservação/produção, tais medidas promovem a redução da demanda energética, sem diminuir a quantidade ou qualidade dos bens e serviços produzidos (NOGUEIRA, 2007).

Da energia produzida no mundo, entre 2% e 3% são destinados ao bombeamento e outros sistemas ligados ao abastecimento de água, dos quais é possível reduzir o consumo de energia em até 25%, aumentando a eficiência dos processos de bombeamento (ALLIANCE, 2002). Segundo Vilanova & Balestieri (2014) a eficiência de uma ETA está relacionada com: i) a quantidade de água tratada efetivamente recebida pelos consumidores; ii) a quantidade de água bruta utilizada; iii) os custos operacionais do sistema; e iv) consumo de energia utilizada nesse processo. Este último é, certamente, o que mais eleva os custos totais de operacionalização de uma ETA, porém, é comum que a política de gestão do sistema reflita de forma a manter a continuidade do abastecimento público em vez da economia de energia elétrica.

Esse consumo de energia elétrica tem relação com a eficiência do bombeamento e com o que está sendo bombeado. Como mostrado por Bross & Addie (2002), a eficiência hidráulica da bomba diminui em função do aumento do diâmetro das partículas em suspensão. Li *et al.* (2011) também identificaram variação da velocidade do rotor em função do tamanho da partícula e as características da abrasão na bomba, que pode aumentar o consumo de energia elétrica em função da carga de sedimentos. Já em relação à abrasão, o autor também identificou que o ângulo de colisão na parede helicoidal aumenta proporcionalmente com o aumento do tamanho da partícula, podendo ocasionar maior desgaste em função do tamanho da partícula, com conseqüente perda de eficiência.

O uso racional de energia tem como objetivo a utilização correta dos recursos energéticos em todas as fases de conversão. Segundo Dias (1999), o uso eficiente de energia pode ser sistematizado em seis níveis de intervenção, sendo que uma delas é o aumento da eficiência das unidades que consomem energia, como o uso de sistemas de bombeamento mais eficientes.

Dentre as dificuldades de otimização das ETAs, destaca-se a inserção de novos elementos, reabilitação ou substituição de elementos e questões que envolvem a operação, confiabilidade e segurança (MONTALVO *et al.*, 2010) que muitas vezes, são dificultados pelos métodos clássicos, baseados em processos interativos de tentativa e erro, onde não são considerados os custos de investimento e os custos operacionais (GOMES & SILVA, 2006).

A definição do tipo de sistema de bombeamento que melhor atenda a demanda, sobre uma pressão previamente especificada, é um dos maiores gargalos para se conseguir um consumo de energia que possa ser considerado energeticamente eficiente. De acordo com Vilanova & Balestieri (2014), comumente, os sistemas existentes são superdimensionados devido aos seguintes fatores:

- Incerteza sobre a deterioração ou crescimento do sistema;
- Utilização de bombas e motores ineficientes;
- Vibração excessiva no eixo e na caixa do conjunto moto bomba e;
- Sobreaquecimento dos rolamentos, e outros.

É importante destacar, que a operação do sistema de moto-bomba, fora do ponto de eficiência acarreta aumento no consumo de energia.

Segundo Kaya *et al.* (2008), aproximadamente 30% da energia utilizada pelas bombas hidráulicas pode ser economizada com a utilização de equipamentos e projetos adequados à demanda, além de condições de trabalho e dimensionamento adequado do sistema. Um dos exemplos disso é o uso de motores de grandes dimensões, capazes de operar em situações críticas de carga. Com isso, Kaya *et al.* (2008) sugerem que durante a seleção e aquisição de um motor deve-se priorizar sua eficiência, que pode variar entre 70% e 96%, de acordo com o tipo e com a forma que for utilizado durante o processo de operação da bomba (dentro ou fora do ponto de maior rendimento do motor).

Para seleção da bomba, De la Torre (2008) informa que parâmetros como a velocidade específica, a velocidade de sucção e a sucção líquida positiva (NPSH), além de influenciar a seleção de bombas centrífugas mais eficientes, influenciam na manutenção destes níveis de eficiência e redução dos prazos de reparação durante a vida útil do equipamento.

Sabe-se que o desempenho de uma bomba centrífuga tende a aumentar diretamente com o tamanho/capacidade, proporcionando uma vantagem de energia sobre a utilização de diversas bombas menores. Entretanto, o uso de vários conjuntos de moto-bombas menores fornece mais flexibilidade para um determinado ponto de trabalho, em particular quando existe uma variação significativa no fluxo. Portanto, ambos os casos devem ser considerados na escolha de bombas em função das limitações de eficiência energética, podendo até mesmo ser utilizados em conjunto (DE LA TORRE, 2008).

Kaya *et al.* (2008) demonstraram que as bombas que operam a velocidades de fluxo inferiores a 40% do valor nominal apresentam níveis elevados de vibração, ruído e cargas radiais que tendem a reduzir significativamente a eficiência. A partir desse conhecimento e adotando-o como uma condição de contorno, pode-se vislumbrar o uso de conjunto moto-bombas com velocidade variável como uma opção de otimização do sistema. De acordo com Gibson (1994) o uso de acionamento com velocidade variável é uma alternativa eficiente em termos de energia para controlar a vazão de saída e a pressão de recalque da bomba. Essa alternativa pode ser usada em substituição às opções tradicionais, como o estrangulamento de válvulas. Entretanto, é importante considerar a curva da bomba de forma que o controle de velocidade seja efetivo e não produza resultados indesejados em termos de eficiência energética.

Tsutiya (2007) relata as vantagens da utilização de velocidade variável, usando inversores de frequências, que podem ser utilizados em estações elevatórias para manter os níveis de pressão e vazão compatíveis com a demanda do sistema. Essa técnica de controle de pressão, evita danos à rede e diminui as perdas de água por vazamento, além de apresentar um consumo menor de energia elétrica em relação a outros métodos de controle de vazão.

A utilização de tecnologias destinadas à variação da velocidade da bomba pode amenizar perdas ao sistema hidráulico e, mesmo com a redução da vazão, o rendimento da bomba deve continuar semelhante. Quando se reduz a vazão pelo método de estrangulamento do fluxo por válvulas, modifica-se a curva do sistema, aumentando a pressão da bomba, para ter a mesma redução de vazão no sistema após a válvula. A aplicação desses variadores de rotação aumenta a vida útil do mancal, das curvas e juntas, diminuindo a possibilidade de falhas, trocas e manutenções desnecessárias (TSUTIYA, 2007).

Neste contexto, observa-se que as medidas tecnológicas são as mais recomendadas para o aumento da eficiência energética dos sistemas de bombeamento e que a implementação de equipamentos mais eficientes é a ação mais efetiva a ser adotada.

#### **4.5 Histórico do Sistema de abastecimento de água no Brasil.**

A necessidade de utilização da água para o abastecimento é indissociável da história de humanidade, determinando os locais de agrupamentos humanos após a adoção da agricultura como meio de subsistência, sendo intensificado com o surgimento de aglomerados urbanos, desde vilas a grandes cidades (HELLER & PÁDUA, 2010).

No Brasil não foi diferente, a maioria das cidades foram levantadas em função da disponibilidade de água para o abastecimento humano. As atividades de abastecimento de água no Brasil iniciaram no século XIX com a concessão a empresas que construíram as primeiras redes de abastecimento de água (MENDES, 1992). Entretanto, embora tenha iniciado em várias cidades, ficaram restritos apenas às áreas centrais dos núcleos urbanos, apresentando problemas no atendimento demandado, o que acarretou a intervenção do Estado no setor (COSTA, 1994).

Durante a crise da década de 1930, o Estado buscou centralizar mais o setor, criando uma política social, em nível nacional, aplicadas às áreas urbanas, contemplando aproximadamente 31% da população brasileira com abastecimento de água (COSTA, 1983). Em 1952, o Serviço Especial de Saúde Pública (SESP), a partir de convênios com os municípios, iniciou a construção de novos sistemas, prevendo o retorno dos investimentos a partir de cobrança de tarifa ou receitas municipais. Na mesma década, houve o fortalecimento do projeto nacional de desenvolvimento, com a priorização da infraestrutura econômica (OLIVEIRA & RUTKOWSKI, 2000).

Na década seguinte, a de 1960, criou-se as primeiras companhias estaduais, financiadas, em sua maioria, por recursos estrangeiros, o que possibilitou o atendimento de 45% da população urbana. Entretanto, a necessidade de recuperar o investimento prevaleceu sobre o interesse social (OLIVEIRA & RUTKOWSKI, 2000).

Já na década de 1970, para tentar atender a demanda decorrente da explosão demográfica nas regiões urbanas, o governo instituiu o Plano Nacional de Saneamento (PLANASA), promovendo mudanças

significativas na prestação dos serviços, financiados, na época, pelo Banco Nacional de Habitação (BNH), com recursos do Fundo de Garantia por Tempo de Serviço (FGTS) e com retornos das operações de crédito (MONTEIRO, 1983). Naquele momento, alguns municípios se recusaram a fazer parte do PLANASA, por defenderem a responsabilidade municipal nas ações de saneamento (ARRETCHE, 1999), sendo obrigados a custear seus investimentos com outras fontes de recursos, como o orçamento fiscal, conseguindo em alguns casos, igualar ou superar os volumes apresentados pelo PLANASA (SEPURB, 1995).

Em 2007, foi promulgada a Lei nº. 11.445/2007, que estabeleceu diretrizes nacionais para o saneamento, prevendo em seu texto a necessidade de se elaborar objetivos e metas que promovessem a universalização dos serviços no setor, sendo reiterado pelo Decreto nº 7.217/2010, que regulamentou a Lei Nacional do Saneamento.

Mais recentemente, em 20 de dezembro de 2013, foi aprovado o Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB), que apresenta uma estratégia para o alcance da universalização dos serviços nos próximos 20 anos (2014-2033), o que pode representar um grande passo para o setor no Brasil. Esse plano traça a meta de atendimento em 100% de cobertura do abastecimento de água potável para áreas urbanas, com investimento na ordem R\$ 31,8 bilhões de reais até 2018, ou seja, R\$6,362 bilhões de reais por ano. O plano também recomenda uma revisão periódica, não ultrapassando o limite de quatro anos e avaliados anualmente com base nos indicadores de monitoramento, resultados e impactos previstos no plano (PLANSAB, 2013).

Mesmo com as perspectivas positivas tratadas no PLANSAB, vale ressaltar a necessidade de revisões, tendo em vista que os cálculos de previsão dos recursos foram realizados prevendo o crescimento do Brasil em 4% ao ano e juros de 3,5% ao ano até 2033, sendo que em 2013 (apresentado na primeira semana de 2014) a Fundação Getúlio Vargas (FGV) estimou a inflação acumulada de 5,63%, com perspectiva de redução de crescimento para os próximos anos (AESBE, 2014).

Confirmando essa perspectiva de redução do crescimento do Brasil, houve uma contração da economia de 3,8% em 2015 (maior contração nos últimos 25 anos) e uma contração de aproximadamente 3,5% em 2016, sendo a primeira vez na história que o país registra dois anos consecutivos de retração. Já para 2017, estima-se uma leve melhora, com perspectiva de crescimento de 0,48%, com uma expectativa de expansão do PIB de 2,37% para 2,39% em 2018 (MARTELLO, 2017).

#### **4.6 Caracterização de uma ETA**

Em geral, uma ETA é composta de estruturas e equipamentos destinados à captação, tratamento e distribuição de água em condições adequadas ao consumo humano (FUNASA, 2006). As estruturas física e tecnológica da ETA são compostas por um conjunto de reservatórios (fonte natural de água bruta, armazenamento e tanques de distribuição), tubulação (adutoras e tubulações), estrutura civil e equipamentos.

A água bruta tomada para processamento em uma ETA pode adentrar no sistema de duas maneiras: natural ou artificial. Na primeira, destacam-se a captação por gravidade ou por fonte pressurizada, enquanto que na captação artificial, a carga hidráulica introduzida na adutora é fornecida por processos de bombeamento. Durante todo o processo de tratamento e distribuição da água (desde a adução até a distribuição), espera-se uma perda parcial de energia hidráulica e elétrica, creditada, sobretudo, à eficiência dos equipamentos e práticas operacionais deficitárias.

#### **4.7 Caracterização das águas de um rio amazônico: o caso do Rio Acre**

A dinâmica geomorfológica do Rio Acre, está ligada ao deslizamento das margens do rio, o que obedece às variações de regime fluvial de cheias e vazantes, ocasionando o assoreamento. O rio transporta grandes quantidades de material sólido em suspensão, oriundos de processos erosivos e se intensificam na estação chuvosa, de outubro a abril. Já no período de estiagem (seca), compreendido entre os meses de maio a setembro, o nível da água baixa (DUARTE & GIODA, 2014) e expõe os dutos de captação de água bruta da ETA. Com isso, é necessário recorrer à instalação de bombas flutuantes, decorrente do nível do rio, que dragam material particulado do fundo do leito.

A bacia do Rio Acre drena as unidades geológicas da Formação Solimões, Terraços Aluvionares Antigos e os sedimentos recentes dos seus afluentes (ALMEIDA *et al.*, 2004). A formação Solimões é constituída predominantemente por rochas sedimentares argilosas sílticas fossilíferas, intercaladas por arenitos finos com estratificação cruzada. Os Terraços Aluvionares Antigos são constituídos de areia, silte e argila. Os materiais em suspensão, trazidos pelo rio, são depositados nas planícies aluvionares atuais e antigas, que incluem depósitos de barra em pontal (praias) e planícies de



inundação, que são constituídos de sedimentos essencialmente finos de deposição recente (ALMEIDA *et al.*, 2004).

Os sedimentos praianos da bacia do rio Acre foram caracterizados como arenosos finos a siltitos com fragmentos de ossos fósseis, angulosos com pouca esfericidade, constituídos de quartzo, feldspatos esmectita, illita e caulinita (ALMEIDA *et al.*, 2004). Já o Rio Acre é classificado como rio de água branca, liminologicamente eutróficos. Apresenta grande carga de sedimentos na fração silte-argila como material em suspensão (REGO *et al.*, 2004). Apresenta também uma variação de pH entre 6,40 a 6,95, com média de 6,73, classificando-a como neutra a levemente ácida, e condutividade elétrica de 412,49  $\mu\text{S}/\text{cm}$  e 245,27  $\text{mg}/\ell$  de sólidos totais dissolvidos (MASCARENHA *et al.*, 2004).

Com base nos dados apresentados por Carvalho *et al* (2008), a concentração de sedimentos em suspensão do Rio Acre varia de 208  $\text{mg}/\ell$  a 840  $\text{mg}/\ell$  no período chuvoso e no período seco variaram de 38  $\text{mg}/\ell$  a 124  $\text{mg}/\ell$ , com médias 471  $\text{mg}/\ell$  e 69  $\text{mg}/\ell$ , respectivamente. Esses dados mostram que concentração de sedimentos no período chuvoso, pode ser 9 vezes maior do que em períodos sem chuva, variando fortemente em função da precipitação pluviométrica.

Segundo o mesmo autor, a granulometria dos materiais em suspensão está situada entre a fração site a areia fina, com a maior concentração variando de 30  $\mu\text{m}$  a 45  $\mu\text{m}$ , que totalizam 30% do sedimento analisado (CARVALHO *et al.*, 2008).

## 5 METODOLOGIA

Muitos estudos realizados sobre a composição do sistema de uma ETA apresentam preferência em analisar separadamente os seus componentes (estações de bombeamento, redes de distribuição, válvulas, reservatórios), considerando a variação das demandas ao longo do dia e os diferentes custos de energia elétrica, manutenção e buscando uma confiabilidade adequada, em termos de atendimento ao consumidor. Há autores que optam por considerar as unidades do sistema (bombas, válvulas, reservatórios, entre outros) conjuntamente no modelo de otimização, tratando o problema com múltiplos objetivos.

Nessa investigação, onde se propõe analisar o desgaste por abrasão e erosão do rotor de conjunto moto-bomba, destinado a captação de água com diferentes quantidades de sedimentos, considerar-se-á de forma sistêmica todos os componentes dos conjuntos moto-bombas e a dinâmica dos sedimentos.

Os itens a seguir destinam-se a descrever os procedimentos metodológicos utilizados para a realização da presente pesquisa, com vistas a responder aos objetivos destacados.

### 5.1 Desgaste do rotores pela abrasão dos sedimentos

Considerando que existem diversos fabricantes e modelos de bombas que podem atuar em EEAB e das dificuldades de aquisição de projetos dos devidos fabricantes, optou-se por realizar este estudo com base em um rotor de projeto, conforme a metodologia descrita por Macintyre (2013). Para tanto, foram utilizados os algoritmos desenvolvidos por Palomino (2017) que partem da demanda de vazão de recalque, altura manométrica e rotação disponível, para indicar as características principais de um rotor.

#### 5.1.1 Determinação das características construtivas do rotor

A determinação das características construtivas do rotor segue a proposta descrita por Palomino (2017), que desenvolveu um algoritmo computacional que correlaciona as principais características de dimensionamento de um rotor de bomba centrífuga, em função da vazão ( $Q$ ), altura manométrica ( $H$ ), e rotação do sistema moto-bomba ( $n$ ), ou seja, em função da rotação específica ( $nq$ ), dada pela EQUAÇÃO (5.1).

$$n_q = 3,65 \times \frac{n\sqrt{Q}}{H^{3/4}} \quad (5.1)$$

O algoritmo desenvolvido por Palomino (2017), leva em consideração a sequência proposta nos capítulos 4; 5; 6; 8; 10; 11 e 12 do livro de Macintyre (2013), permitindo uma rápida determinação de um rotor de projetos conforme sequência apresentada na FIG. (5.1) e utilizando as EQUAÇÕES de (5.2 a 5.28).

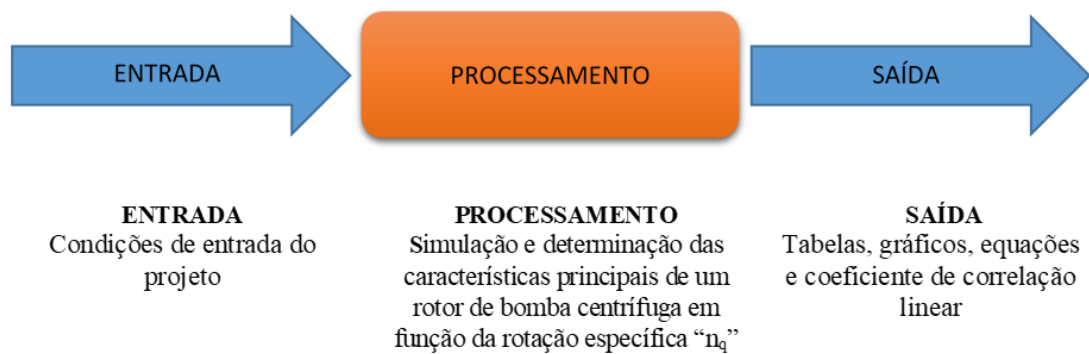


FIGURA 5.1 – Sequência de processamento do algoritmo.

FONTE – PALOMINO, 2017, p. 49

As equações aplicadas no algoritmo desenvolvido por Palomino (2017), que serão usadas para determinação das características do rotor, podem ser observadas a seguir:

Estimativa de rendimento hidráulico ( $\varepsilon$ )

$$\varepsilon = 1 - \frac{0,8}{\sqrt[4]{Q_{gpm}}} \quad (5.2)$$

Potencia motriz ( $N_{cv}$ )

$$N_{cv} = \frac{1000 Q H}{75\eta_t} \quad (5.3)$$

Diâmetro do eixo ( $dei$ )

$$dei = 12 \sqrt[3]{\frac{N_{cv}}{n}} \quad (5.4)$$

Diâmetro do eixo Corrigido ( $dei_{corr}$ )

$$dei_{corr} = 1,15(dei) \quad (5.5)$$

Diâmetro do núcleo ( $dn$ )  $dn = dei_{corr} + (2 (5 \text{ a } 15 \text{ mm}))$  (5.6)

Velocidade média ( $v'1$ ) na entrada do rotor  $v'1 = kv'1\sqrt{2gH}$  (5.7)

Diâmetro da boca de entrada do rotor ( $d'1$ )  $d'1 = \sqrt{\frac{4Q'}{\pi v'1} + (dn)^2}$  (5.8)

Velocidade meridional na entrada do rotor ( $v_{m1}$ )  $v_{m1} = k_{vm1}\sqrt{2gH}$  (5.9)

Velocidade periférica no bordo de entrada ( $u1$ )  $u1 = \frac{\pi d_{m1} n}{60}$  (5.10)

Ângulo  $\beta1$  de inclinação da pá na entrada do rotor  $\tan \beta1 = \frac{v_{m1}}{u1}$  (5.11)

Número de pás ( $Z$ )  $Z = 6,5 \left( \frac{d_2 + d_{m1}}{d_2 - d_{m1}} \right) \text{sen} \left( \frac{\beta_1 + \beta_2}{2} \right)$  (5.12)

Passo circunferencial entre as pás ( $t_1$ ) na entrada do rotor  $t_1 = \frac{\pi d_{m1}}{Z}$  (5.13)

Obstrução devida à espessura da pá ( $\sigma$ ) na entrada do rotor  $\sigma_1 = \frac{S_1}{\text{Sen } \beta_1}$  (5.14)

Coefficiente de contração ( $\gamma1$ )  $\frac{1}{\gamma_1} = \frac{t_1}{t_1 - \sigma_1}$  (5.15)

Largura ( $b_1$ ) na entrada da pá considerando  $\sigma_1$   $b_1 = \frac{Q'}{v_{m1}(\pi d_{m1} - Z \sigma_1)}$  (5.16)

Velocidade periférica na saída ( $u_2$ )  $u_2 = k_{u2}\sqrt{2gH}$  (5.17)

Diâmetro de saída do rotor ( $d_2$ )

$$d_2 = \frac{60 u_2}{\pi n} \quad (5.18)$$

Altura desejada ( $H_e$ ) para  $\varepsilon = 0,87$

$$H_e = \frac{H}{\varepsilon} \quad (5.19)$$

Altura de elevação ( $H'_e$ ), adotando:  $\psi$  de 1,1 a 1,2

$$H'_e = H_e \left( 1 + \frac{8}{3} \times \frac{\psi}{Z} \right) \quad (5.20)$$

Velocidade meridional na saída do rotor ( $v_{m2}$ )

$$v_{m2} = k_{vm2} \sqrt{2gH} \quad (5.21)$$

Velocidade periférica na saída do rotor ( $u_{2(corr)}$ )

$$u_{2(corr)} = \frac{v_{m2}}{2 \tan \beta_2} + \sqrt{\left( \frac{v_{m2}}{2 \tan \beta_2} \right)^2 + gH'_2} \quad (5.22)$$

Diâmetro retificado de saída do rotor ( $d_{2(ret)}$ )

$$d_{2(ret)} = \frac{60 u_{2(corr)}}{\pi n} \quad (5.23)$$

Passo circunferencial entre as pás ( $t_2$ )

$$t_2 = \frac{\pi d_{2(ret)}}{Z} \quad (5.24)$$

Espessura da pá ( $S1 = S2$ )

$$\begin{aligned} & 3 \text{ a } 4 \text{ mm se: } d_2 < 30\text{cm}; \text{ ou;} \\ & 5 \text{ a } 7\text{mm se: } 30\text{cm} > d_2 > 50\text{cm} \end{aligned} \quad (5.25)$$

Obstrução devida à espessura da pá na saída ( $\sigma_2$ )

$$\sigma_2 = \frac{S_2}{\text{Sen } \beta_2} \quad (5.26)$$

Coefficiente de contração ( $\gamma_2$ )

$$\gamma_2 = \frac{t_2 - \sigma_2}{t_2} \quad (5.27)$$

Largura da pá retificada ( $b_{2(ret)}$ )

$$b_{2(ret)} = \frac{Q'}{\pi d_{2(ret)} v_{m2} \gamma_2} \quad (5.28)$$

Para demonstrar melhor, é importante entender os triângulos de velocidade considerados no processo de bombeamento. Carvalho (2010) relata que conhecer essas velocidades é fundamental para qualquer projeto de máquina de fluxo (turbinas hidráulicas, turbinas a gás, ventiladores, compressores rotativos, bombas hidráulicas e etc.). Macintyre (2013) cita que o vetor velocidade “V” do movimento absoluto resulta da composição geométrica dos vetores “U” e “W” representativos das velocidades “u” – de arrastamento (chamada de velocidade periférica ou circunferencial), e “w” – relativa. Observando a FIG. 5.2 e adotando letras maiúsculas para os vetores, letras minúsculas para os módulos, notação “1” para entrada e “2” para saída do rotor, tem-se:

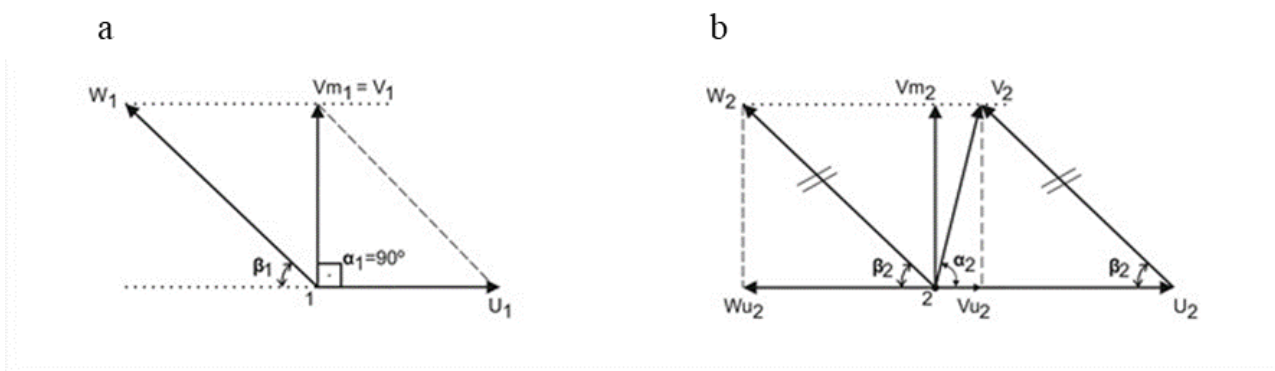


FIGURA 5.2 – Triângulos de velocidade na entrada (a) e saída (b) da pá de um rotor.

FONTE – MACINTYRE, 2013, (a) p.236 e (b) p.241

Sendo:

- “w” – Velocidade relativa (componente de “V” na direção tangente ao perfil da pá);
- “u” – Velocidade tangencial a circunferência do rotor (componente de “U” em uma direção tangente às circunferências de entrada e saída)
- “α” – Ângulo formado pelo vetor velocidade absoluta “V” com o vetor velocidade circunferencial “U”,
- “β” – Ângulo formado pelo vetor velocidade relativa “W” com o prolongamento em sentido oposto ao vetor (“U1”). Os ângulos “β1” e “β2” determinam as inclinações da pá na cabeça (entrada) e cauda (saída) respectivamente.

As velocidades “V1” e “V2” poderão ser decompostas segundo duas direções: uma na direção de “U” na entrada e na saída (“vu”) e outra na direção ortogonal de “U” na entrada e na saída (“vm”), conforme observado na FIG. 5.3.

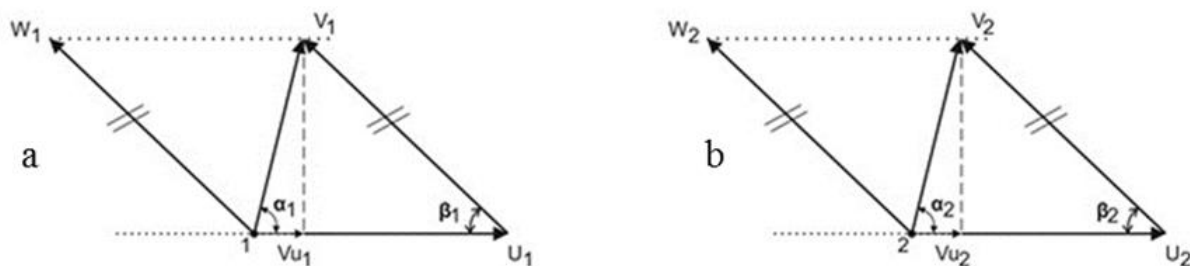


FIGURA 5.3 – Triângulos de velocidade na entrada (a) e saída (b) da pá de um rotor decomposto.

FONTE – MACINTYRE, 2013, p. 99

Sendo:

- “ $v_{u1}$ ” - **Velocidade periférica** na entrada da pá. É a projeção de “ $v_1$ ” segundo a direção de “ $u_1$ ”. Sendo definida pela expressão: “ $v_{u1} = v_1 \cos \alpha_1$ ”, se for considerado que “ $\alpha_1 = 90^\circ$ ”, “ $\cos \alpha_1 = 0$ ”, então, tem-se “ $v_{u1} = 0$ ”. A componente periférica “ $v_u$ ”, aparece nas expressões da energia cedida pelo rotor ao líquido, se for considerado o “ $\alpha_1 = 90^\circ$ ” o “ $v_{u1}$ ” será nulo, isto é, o fluido está entrando no rotor, portanto, ainda não cedeu energia.
- “ $v_{u2}$ ” - **Velocidade periférica** na saída da pá. É a projeção de “ $v_2$ ” segundo a direção de “ $u_2$ ”. Esta velocidade é definida pela expressão:  $v_{u2} = v_2 \times \cos \alpha_2$ . O valor “ $\alpha_2$ ” é determinado ou arbitrado, isto é, o fluido está saindo do rotor, portanto, está cedendo energia ao fluido que está saindo.
- “ $v_{m1}$ ” - **Velocidade meridiana** na entrada da pá é a projeção de “ $v_1$ ” segundo a direção ortogonal a “ $u_1$ ”.
- “ $v_{m2}$ ” - **Velocidade meridiana** na saída da pá é a projeção de “ $v_2$ ” segundo a direção ortogonal a “ $u_2$ ”. Sendo definida pela expressão: “ $v_{m2} = v_2 \sin \alpha_2$ ”. O valor “ $\alpha_2$ ” é determinado ou arbitrado.

Para um melhor visualização dos triângulos de velocidade em um rotor a FIG. 5.4 ilustra um diagrama de velocidade de uma partícula líquida. Tal visualização é importante para entender a dinâmica da carga de sedimento que está sendo bombeada junto com a água em uma EEAB.

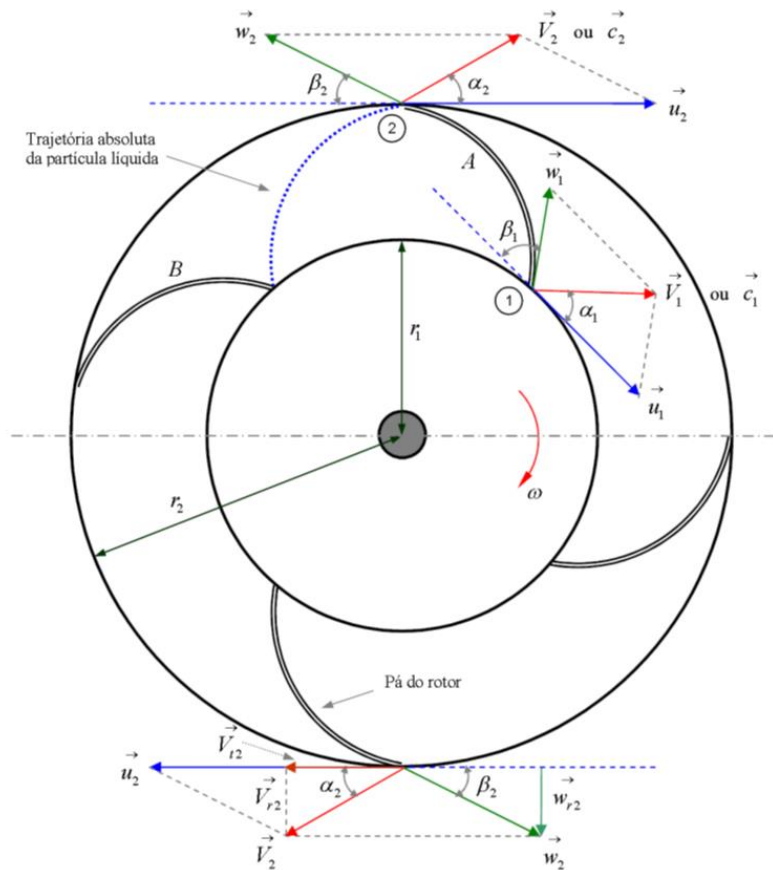


FIGURA 5.4 – Diagrama de velocidade de uma partícula líquida  
 FONTE – BRASIL, 2010

Por fim, esse algoritmo fornecerá as seguintes características construtivas de um rotor (PALOMINO, 2017), cujos dados serão utilizados para o cálculo das forças e pressões atuantes nas pás do rotor:

- Rotação da bomba ( $n$ ), para cada condição de  $H$ , na rotação específica ( $nq$ ) e vazão ( $Q$ ) constante.
- Velocidade média da boca de entrada do rotor ( $v_1$ );
- Diâmetro da boca de entrada do rotor ( $d_1$ );
- Diâmetro de saída do rotor ( $d_2$ );
- Velocidade meridiana de entrada do rotor ( $vm_1$ );
- Velocidade periférica no bordo de entrada do rotor ( $u_1$ );
- Velocidade meridiana de saída do rotor ( $vm_2$ );
- Velocidade periférica à saída do rotor ( $u_2$ );
- Largura de entrada rotor ( $b_1$ );
- Largura de saída do rotor ( $b_2$ )



### 5.1.2 Determinação das forças nas pás do rotor.

Com base nas características construtivas do rotor, foi determinado o comprimento da pá que, por sua vez, foi dividida em 5 seções para determinação das forças atuantes, que variam da entrada para saída do rotor (FIG. 5.5).

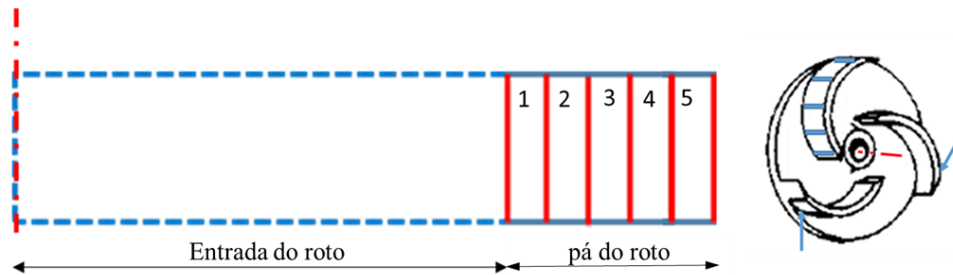


FIGURA 5.5 – Esquema de divisão das seções estudadas do rotor

Com base nos campos de velocidade que ocorrem em cada seção do rotor, foram determinadas as forças de arrasto abrasivo que ocorrem na superfície das pás. Segundo Fox (2006), o arrasto é a componente da força sobre um corpo que atua paralelamente à direção do movimento relativo, podendo ser escrita como apresentado na EQUAÇÃO (5.29).

$$F_D = \frac{Cd \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A}{2} \quad (5.29)$$

Sendo:

$F_D$  – Força de arrasto abrasivo

$Cd$  – Coeficiente de arrasto

$A$  – Área [m<sup>2</sup>]

$\rho$  – Densidade do fluido

$V$  – Velocidade

O coeficiente de arrasto para fluxos paralelos à superfície pode ser obtido pela equação de Schiller de 1933 (EQUAÇÃO 5.30):

$$C_D = \frac{24}{Re} (1 + 0,15 (Re^{0,687})) \quad (5.30)$$

Já o número de Reynolds ( $Re$ ) é uma relação entre forças de inercia e força viscosa, que pode ser expressa de acordo com a EQUAÇÃO (5.31):

$$Re = \frac{xV\rho}{\mu} \text{ ou } Re = \frac{xV}{\nu} \quad (5.31)$$

Entretanto, Fox (2006) relata que, se o escoamento for laminar ( $Re < 5 \times 10^5$ ), pode-se usar a EQUAÇÃO (5.32) para o cálculo do Coeficiente de arrasto:

$$C_D = \frac{1,33}{\sqrt{Re}} \quad (5.32)$$

Se considerarmos o escoamento turbulento desde o bordo de ataque ( $5 \times 10^5 < Re < 10^7$ ), a EQUAÇÃO (5.33) é a mais recomendada:

$$C_D = \frac{0,0742}{Re^{(0,2)}} \quad (5.33)$$

Caso o escoamento seja inicialmente laminar e no decorrer da área de escoamento, passe a ser turbulento, o coeficiente de arrasto turbulento deve ser ajustado para levar em consideração o escoamento laminar no comprimento inicial. Para um “ $Re$ ” na transição de  $5 \times 10^5$ , o coeficiente de arrasto pode ser calculado fazendo o ajuste na EQUAÇÃO (5.33), ficando como na EQUAÇÃO (5.34):

$$C_D = \frac{0,0742}{Re^{(0,2)}} - \frac{1740}{Re} \quad (5.34)$$

Fox (2006), relata também que, em caso de “ $5 \times 10^5 < Re < 10^9$ ”, o mesmo ajuste realizado na EQUAÇÃO (5.34), poder ser aplicado à Equação (5.35) empírica dada por Schlichting em 1979, obtendo-se a Equação (5.36):

$$C_D = \frac{0,455}{(\log Re)^{2,58}} \quad (5.35)$$

Ficando assim:

$$C_D = \frac{0,455}{(\log Re)^{2,58}} - \frac{1740}{Re} \quad (5.36)$$

### 5.1.3 Ensaio de resistência ao desgaste abrasivo do tipo esfera-sobre-placa

O conhecimento do desgaste sofrido pela superfície do material, a partir de um método reproduzível e bem caracterizado, é importante para sua avaliação e aplicação. Neste âmbito, o ensaio de desgaste por microabrasão ou ensaio de desgaste do tipo de esfera-sobre-placa tem-se mostrado como uma técnica muito eficiente na avaliação do desgaste abrasivo de superfícies.

Neste ensaio, a amostra é pressionada, pelo carregamento de um peso inoperante, contra uma esfera de aço em rotação. Uma suspensão abrasiva é gotejada na interface de desgaste. Após a esfera percorrer uma distância previamente estabelecida, chamada de distância de rodagem, ocorre a formação de uma depressão circular ou calota sobre a superfície da amostra. O ensaio é finalizado e a calota proveniente do desgaste é medida para se determinar, a partir do seu diâmetro, a taxa de desgaste (RUTHERFORD *et al.* 1997; ALLSOPP & HUTCHINGS, 2001; COZZA *et al.*, 2015; SANTOS *et al.*, 2015; KRELLING *et al.*, 2017). A FIG. 5.6 apresenta um diagrama esquemático do dispositivo de ensaio de microabrasão.

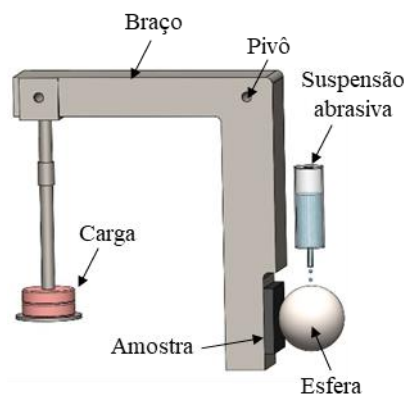


FIGURA 5.6 – Diagrama esquemático do dispositivo de ensaio de microabrasão

A caracterização dos mecanismos de desgaste tem sido feita de acordo com as deformações observadas na superfície de desgaste das amostras nas várias condições de ensaio. O processo dominante é controlado pela natureza do movimento das partículas abrasivas na região de contato das

duas superfícies, destacando-se os mecanismos de desgaste abrasivo a dois e a três corpos (HUTCHINGS, 1992; AXÉN *et al.*, 1994; SASADA *et al.*, 1984; ARTUZO, 2014):

- Mecanismo de abrasão a dois corpos: acontece quando não há movimento das partículas abrasivas em relação a uma das superfícies. Neste caso as partículas abrasivas promovem a formação de sulcos paralelos sobre a outra superfície.
- Mecanismos de abrasão a três corpos: acontece quando partículas abrasivas duras são introduzidas entre duas superfícies e rolam entre as mesmas promovendo a formação de múltiplas marcas sem direcionamento evidente.

As equações que permitem calcular o coeficiente de desgaste, a partir do volume de material removido em ensaios com contra corpo esférico foram inicialmente estabelecidas por Kassman *et al* (1991). Posteriormente, Rutherford & Hutchings (1996) generalizaram essas equações para o caso de amostras planas e curvas e para o cálculo do coeficiente de desgaste de filmes independentemente do substrato.

No ensaio de desgaste de microabrasão do tipo esfera-sobre-placa, uma calota esférica é gerada (FIG. 5.7) sobre a superfície ensaiada, devido à perda do material no contato esfera-amostra e sob a ação do abrasivo (ALLSOPP & HUTCHINGS, 2001; COLAÇO, 2001).

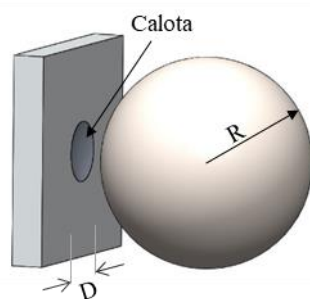


FIGURA 5.7 – Calota Esférica produzida pelo desgaste abrasivo na peça

Os ensaios de desgaste por microabrasão podem ser empregados em processos de caracterização de materiais, permitindo avaliar a qualidade de componentes quanto a sua estrutura de formação, revestimento e tratamento.

Após a realização dos ensaios de desgaste, a técnica mais simples para o cálculo do coeficiente de desgaste se baseia na leitura do diâmetro médio da calota formada pelo desgaste seguida da aplicação das EQUAÇÕES de 5.37 a 5.40 apresentadas a seguir (RUTHERFORD *et al.* 1997; ALLSOPP & HUTCHINGS, 2001; SANTOS *et al.*, 2015; KRELLING *et al.*, 2017). A medida desse diâmetro foi realizada por Microscópio de Varredura Eletrônica (MEV).

$$\text{Volume teórico removido } (Q_D): \quad Q_D = \frac{\pi D^4}{64 \cdot R} \quad (5.37)$$

$$\text{Distância teórica percorrida } (S) \quad S = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot n \quad (5.38)$$

$$\text{Taxa teórica de desgaste } (Q_T) \quad Q_T = \frac{Q_D}{S} \quad (5.39)$$

$$\text{Coeficiente de desgaste do material } (K) \quad K = \frac{Q_T}{F_N} \quad (5.40)$$

Sendo:

$D$  – Diâmetro da calota;

$R$  – Raio da esfera;

$n$  – Número de voltas da esfera.

$F_N$  – Força normal aplicada a superfície da amostra.

#### 5.1.3.1 Ensaios tribológicos

Os ensaios de desgaste abrasivo foram realizados em um abrasômetro de esfera rotativa do Laboratório de Microabrasão da Universidade Federal de Ouro Preto (FIG. 5.8). Esse aparato é constituído de estruturas em aço inoxidável robusta para evitar vibrações, onde é passado um eixo adaptado para fixação da esfera. O eixo é ligado a um motor de velocidade controlada, que também aciona uma bomba peristáltica responsável pelo bombeamento contínuo da solução abrasiva. A estrutura metálica responsável por pressionar o corpo de prova contra esfera permite um deslocamento horizontal para facilitar o deslocamento para repetição dos ensaios e a carga suspensa permite o controle da força aplica entre a esfera e a amostra.

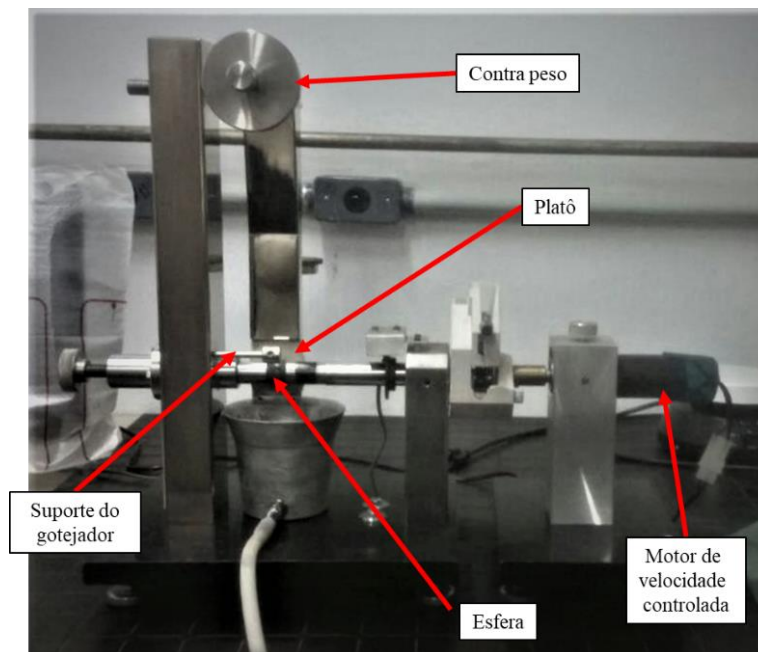


FIGURA 5.8 – Abrasômetro de esfera rotativa da UFOP

FONTE – Elaborado pelo Autor

O motor de velocidade controlada é ligado a uma interface ao um computador, que controla a rotação da máquina em função do tempo e da distância de rolagem e independente da carga aplicada (FIG. 5.9).

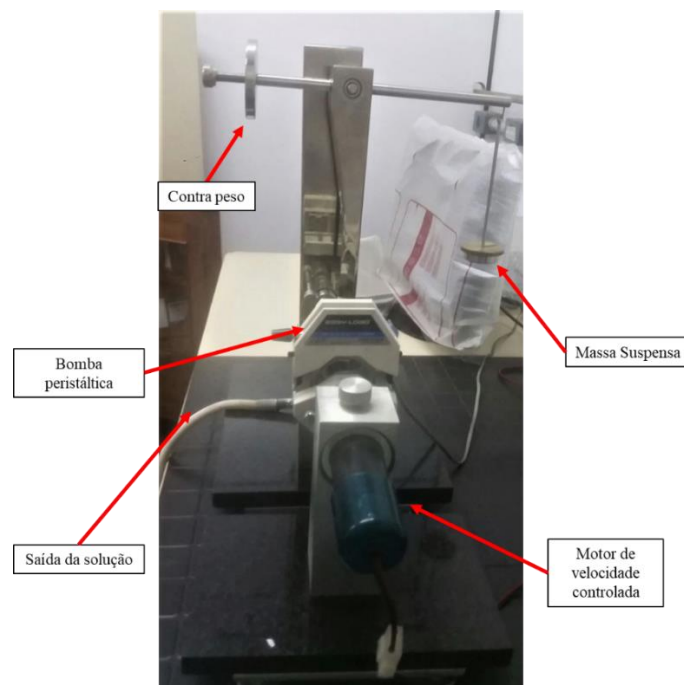


FIGURA 5.9 – Vista lateral do abrasômetro de esfera rotativa da UFOP

FONTE – Elaborado pelo Autor

Para a realização dos ensaios, foram utilizadas suspensões abrasivas, compostas de amostras de sedimentos bombeados pela EEAB da ETA II e carboneto de silício. Os corpos de prova foram ensaiados no abrasômetro com uma esfera de ensaio de 25,4 mm de diâmetro constituída de aço SAE 52100, a uma rotação de 100 rpm, com duração de 23 minutos para cada ensaio e distância de rolagem de 180m.

#### 5.1.3.2 Desenho amostral dos ensaios de abrasão

Os ensaios de abrasão foram realizados em 3 etapas (TAB. 5.1):

Inicialmente foi determinado qual a  $F_N$  mais apropriado para impressão de uma calota de desgaste, considerando a menor concentração de abrasivo (1g/ℓ de sedimento) e variando a  $F_N$  (1N; 2N e 3N) aplicada sobre a esfera rotativa, totalizando 27 ensaios nessa etapa.

Determinada a  $F_N$  capaz de imprimir uma calota de desgaste nas 3 ligas metálicas, os ensaios seguiram para segunda etapa, onde variou-se a concentração dos sedimentos em: 1 g/ℓ; 2 g/ℓ; 3 g/ℓ; 5 g/ℓ e 10 g/ℓ, o que permitiu a elaboração de uma curva de desgaste em função da concentração de sedimento, totalizando nesta etapa mais 36 ensaios, dos quais 12 foram aproveitados do procedimento de determinação da  $F_N$  mais apropriado para impressão da calota de desgaste.

Após a realização dos ensaios de abrasão com sedimentos, foram realizados os ensaios com carboneto de silício na concentração de 10 g/ℓ, com a mesma  $F_N$  aplicado à esfera durante os ensaios com sedimento, a fim de se comparar a intensidade do desgaste abrasivo do sedimento com o desgaste ocasionado com um material de referência comumente utilizado em ensaios de resistência à abrasão, ou seja, para determinar o quanto o sedimento é mais ou menos abrasivo que um material de referência.

TABELA 5.1

Resumo do desenho amostral dos ensaios de abrasão

1º Etapa	2º Etapa	3º Etapa
3 forças $F_N$ (1, 2 e 3 N)	3 Ligas metálicas	3 Ligas metálicas
3 Ligas metálicas	5 concentrações de sedimento (1g/l; 2g/l; 3g/l, 5g/l; e 10 g/l)	1 Concentração de carboneto de silício (10g/l)
1 Concentração de sedimento (menor concentração 1g/l)	1 Força $F_N$	1 Força $F_N$
3 repetições	3 repetições	3 repetições
<b>Objetivo:</b> Determinar a melhor $F_N$ capaz de imprimir uma calota de desgaste dentro dos parâmetro de ensaio..	<b>Objetivo:</b> Determinar o $K$ para as 3 ligas metálicas em função da carga de sedimento.	<b>Objetivo:</b> Determinar um parâmetro de referência comparativa ao desgaste por sedimento.
Total = 27 ensaios	Total = 45 ensaios	Total = 18 ensaios

### 5.1.3.3 Análise estatística dos ensaios de microabrasão.

Para demonstrar a tendência de manutenção do  $K$  em função da  $F_N$ , comparar os efeitos das concentrações de sedimento no desgaste de 3 ligas metálicas e comparar a capacidade abrasiva do sedimento com o carboneto de silício, adotou-se a análise de variância ANOVA (ANalysis Of VAriance), para comparações múltiplas (TAB. 4.5) (PIMENTEL-GOMES, 2009), considerando o mesmo número de repetições para todos os tratamentos e as condições controladas proporcionadas no Laboratório de Microabrasão.

TABELA 5.2  
Análise ANOVA

Fonte de variação (FV)	Graus de liberdade (GL)	Soma de quadrados (SQ)	Média dos quadrados (QM)	Teste F	$F_{tab;\alpha}$
Fatores	(I-1)	SQTrat	$\frac{SQTrat}{I-1}$	$\frac{QMTrat}{QMRes}$	[(I-1); I(J-1)]
Resíduo	I(J-1)	SQRes	$\frac{SQRes}{J-1}$		
Total	IJ-1	SQTotal			

FONTE - PIMENTEL-GOMES, 2009

A partir das SQTrat e SQRes, foram obtidos os respectivos quadrados médios, por meio do quociente entre a soma de quadrados com o respectivo número de graus de liberdade.

Para concluir se existe diferença entre tratamentos, calculou-se o valor de F, que é obtido pelo quociente do QMTrat com o QMRes. Este valor de F calculado deve ser comparado com o valor de



F tabelado, o qual é obtido na tabela de distribuição da variável aleatória F, de acordo com o nível de significância do teste, graus de liberdade para tratamentos e graus de liberdade para resíduo.

Se o teste F para a fonte de variação que representa o fator em estudo não for significativo, todos os possíveis contrastes entre médias dos tratamentos serão considerados estaticamente iguais (sem diferença significativa), não sendo necessário a aplicação de nenhum procedimento de comparações múltiplas (PIMENTEL-GOMES, 2009).

Por outro lado, se o teste F mostrar diferença significativa, implica que existe pelo menos um contraste entre as médias analisadas que diferem-se estatisticamente. Nesses casos, adota-se o teste de Tukey para identificar os ensaios com diferença mínima significativa (dms) (PIMENTEL-GOMES, 2009).

Antes da interpretação das análises de variância, verificou também se as estimativas dos resíduos satisfazem as seguintes pressuposições:

- Normalidade da distribuição dos erros experimentais;
- Homogeneidade das variâncias residuais;
- Independência dos erros (os erros não são correlacionados).
- Delineamento inteiramente casualizado

Para realizar as análises estáticas foi utilizado o *software* ASSISTAT 7.7, desenvolvido por Silva & Azevedo (2016)

#### 5.1.3.4 Aquisição e preparo das amostras de ligas metálicas

Dos três tipos de materiais utilizados na fabricação de rotores (FIG. 5.10), apenas o ferro fundido (FoFo) nodular foi retirado de um rotor genuíno de uma bomba Flygt. Devido à dificuldade de aquisição de outras amostras junto aos fabricantes, optou-se pela aquisição de mais 2 materiais em barra com composição e dureza idênticas aos materiais utilizados na fabricação de rotores.

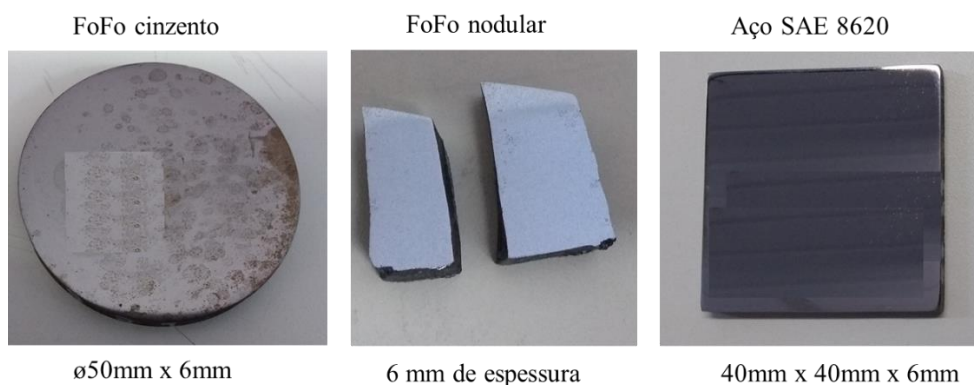


FIGURA 5.10 – Amostras das ligas metálicas utilizadas nos ensaios de abrasão.

Conforme metodologia descrita por Rohde (2010), as amostras foram lixadas, polidas e limpas. A operação de lixamento teve como objetivo eliminar riscos e marcas mais profundas da superfície, preparando a peça para o polimento. Para este trabalho optou-se pela técnica de lixamento manual, onde as amostras foram lixadas com granulometria que variando de 100# para 1200#, mudando-se a direção em 90° em cada mudança de lixa, tomando o cuidado de mudar a lixa apenas quando os traços da lixa anterior não apareciam mais (FIG. 5.11).

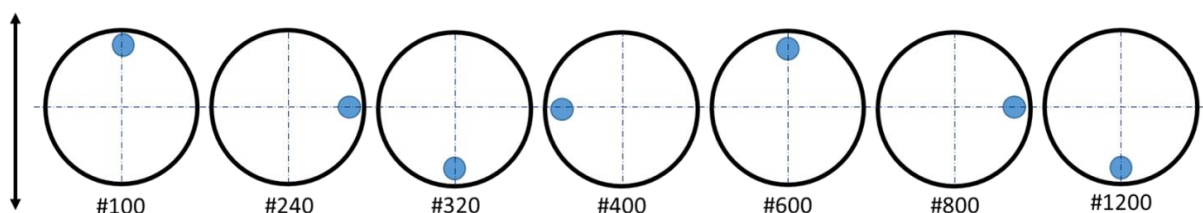


FIGURA 5.11 – Representação esquemática do método de lixamento

FONTE – ROHDE, 2010, p. 15

Após lixamento, as amostras passaram pelo procedimento de polimento com alumina de 1  $\mu\text{m}$  na concentração de 10%, seguido por polimento com pasta de diamante de 1  $\mu\text{m}$  e 0,25  $\mu\text{m}$  para acabamento superficial isento de marcas. O procedimento foi realizado por processo mecânico em Politriz de bancada com velocidade variável (FIG. 5.12).



FIGURA 5.12 – Polimento das amostra em politriz de bancada

FONTE – Elaborado pelo Autor.

Em seguida as amostras foram lavadas em água corrente para eliminação dos vestígios dos abrasivos, seguida da aplicação de álcool etílico para facilitar a secagem. Em seguida foi separado uma amostra de cada material para passar pela análise metalográfica para estudo das microestruturas e análises químicas em espectrômetro de emissão ótica

#### 5.1.3.5 Preparo dos abrasivos

Cada amostra de sedimento foi agitada com água destilada para homogeneização, em 5 concentrações diferentes 0,1%, 0,2%, 0,3%, 0,5% e 1,0% (1 g/l; 2 g/l; 3 g/l, 5 g/l e 10 g/l, respectivamente). Em seguida, foi retirada uma amostra antes da decantação, para serem utilizadas como suspensão abrasiva nos ensaios de desgaste e para análise morfológica (FIG. 5.13).

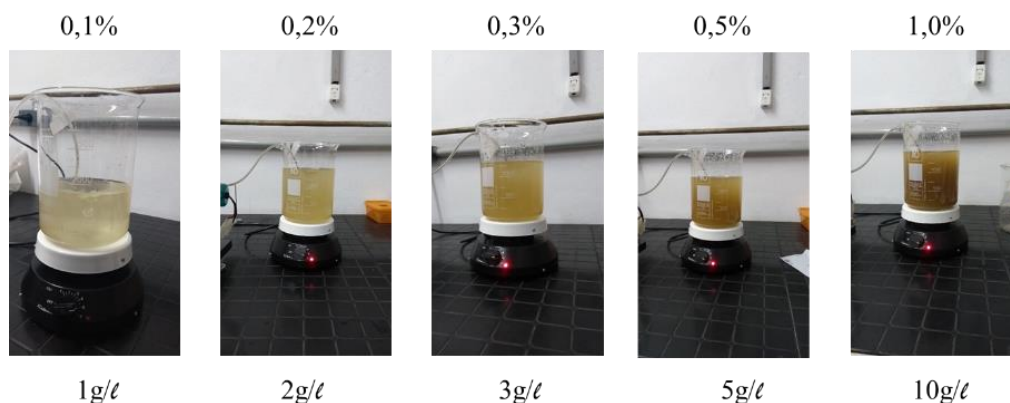


FIGURA 5.13 – Preparação das suspensões abrasivas com sedimentos do rio Acre

FONTE – Elaborado pelo Autor.

Para comparação da abrasividade dos sedimentos e da resistência ao desgaste abrasivo dos corpos de provas, também foi preparada uma amostra de suspensão abrasiva de Carboneto de Silício SiC, a 1%

de concentração (10 g/ℓ) (FIG. 5.14). Esse procedimento permitiu registrar uma referência de abrasividade ocasionada pelo sedimento utilizado em função de um abrasivo padrão, comumente utilizados em outros ensaios.

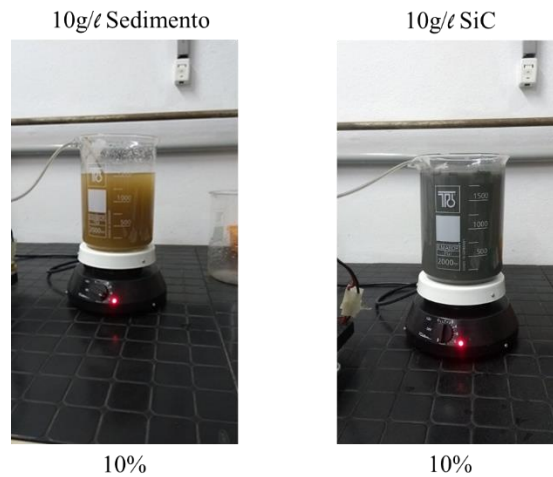


FIGURA 5.14 – Preparo de soluções abrasivas (Sedimento e SiC)  
FONTE – Elaborado pelo Autor.

## 5.2 Distribuição de tamanhos das partículas abrasivas

Para obtenção da distribuição granulométricas das partículas do sedimento, utilizou-se a análise combinada do método de sedimentação e peneiramento, conforme a NBR 7181 de dezembro de 1984, que leva em consideração as normas NBR 5734 (Especificações - peneira para ensaio); NBR 6457 (Método de ensaio - Preparação de amostras de solo para ensaio normal de compactação e ensaios de caracterização); e NBR 6508 (Método de ensaio – Grão de solos que passam na peneira 4,8mm – determinação da massa específica).

### 5.2.1 Análise morfometria dos grãos de sedimentos separados por peneiramento.

A morfologia da partícula é o resultado do transporte de diferentes agentes da rocha do seu local original para locais de deposição, sendo que a forma final do seixo é influenciada pelo rigor do transporte, esfoliação, mudanças de temperatura e etc. (RODRIGUEZ *et al.*, 2013). O estudo dessa morfologia permite a caracterização das partículas sedimentares, possibilitando um melhor entendimento do tempo de permanência das partículas no ciclo sedimentar; na dinâmica do transporte e retrabalhamento dos grãos (RIBEIRO & BONETTI, 2013).

Para realizar essa etapa, foram registradas imagem dos sedimentos utilizados como partículas abrasivas, usando-se um microscópio eletrônica de varredura (MEV). Em seguida, essas imagens foram analisadas utilizando o *software* livre ImgeJ, para determinação de seus atributos morfológicos, conforme descrito por Ribeiro e Bonetti (2013).

### 5.3 Análise das calotas por microscopia eletrônico de varredura

O microscópio eletrônico de varredura (MEV) é um equipamento capaz de produzir imagens de alta ampliação (até 300 mil vezes) e resolução. O princípio de funcionamento do MEV consiste na emissão de feixes de elétrons por um filamento capilar de tungstênio (eletrodo negativo), mediante a aplicação de uma diferença de potencial que pode variar de 0,5 kV a 30 kV.

Nessa etapa foram registradas a imagens das calotas e a medição do diâmetro em milímetros com 50X de ampliação. Em seguida, foram capturadas imagens do fundo da calota com aproximação de 500X, 1000X e 3000X, para análise do padrão do desgaste em função da  $F_N$ , do material abrasivo e do material do corpo de prova (FIG. 5.15).

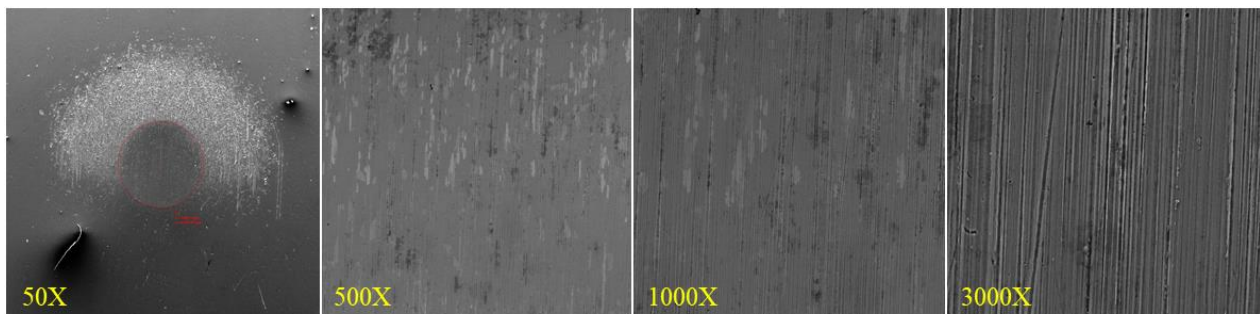


FIGURA 5.15 – Exemplos das ampliações utilizadas na análise das calotas de desgaste.

FONTE – Elaborado pelo Autor.

Observa-se também, que as imagens registradas com aproximação de 3000X mostram perfeitamente o padrão de desgaste, que poderá apresentar a característica de sulcamento, como o mostrado na referida ampliação, ou por rolamento quando as concentrações de abrasivo forem superiores a 18% (COZZA, 2011).

## 5.4 Estimativa do desgaste do rotor

A estimativa do desgaste do rotor foi prevista com base na equação de Archard modificada (SANTOS *et al.*, 2015). Considerando o coeficiente de desgaste ( $k$ ) apresentado na EQUAÇÃO (4.2) é uma constante adimensional que será dividida pela dureza do material ( $H$ ) desgastado e que, o  $K$  apresentado na EQUAÇÃO (5.40) se refere a um coeficiente de desgaste específico para um material em função de um abrasivo, pode-se fazer o seguinte ajuste na equação:

$$Q = K \cdot F_N \cdot S \quad (5.41)$$

Sendo:

$Q$  – O volume teórico removido do material [m<sup>3</sup>]

$K$  – Coeficiente de desgaste específico do material [m<sup>3</sup>/N.m]

$F_N$  – A força aplica sobre uma seção da pá [N]

$S$  – Distância relativa de deslizamento da pá [m]

Considerando a velocidade relativa da mistura (água + sedimento) passando por uma determinada área da pá do rotor, estimou-se uma distância relativa ( $S$ ) conforme a EQUAÇÃO (5.42).

$$S = V \cdot t \quad (5.42)$$

Sendo:

$V$  – Velocidade relativa do fluido passando pela pá [m/s]

$t$  – tempo de funcionamento da bomba [s]

A força  $F_N$  considerada nesta análise, foi calculada a partir da EQUAÇÃO (5.29) da força de arrasto que ocorre em uma determinada seção da pá.

### 5.4.1 Estimativa do desgaste em função da variação da cota do Rio Acre

Com base na cota média do rio Acre (DUARTE & GIODA, 2014), que altera a altura manométrica ( $H$ ) da estação elevatória, determinou-se a variação da rotação da bomba em 100%, 95%, 90%, 85%

e 80% (MACINTYRE, 2013). Em seguida, determinou-se a variação da  $F_D$  com base na variação da velocidade relativa  $w$ , decorrente da variação da rotação da bomba, permitido estimar a variação do desgaste do rotor em função da carga de sedimentos e da cota do rio Acre.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 Análise prévia de rotores reais

No intuito de entender a dinâmica do desgaste, foram analisados 2 rotores utilizados em 2 EEAB que bombeiam água do Rio Acre. Observou-se que os rotores foram submetidos a uma combinação de impacto direto na ponta e na base das pás, desgastando o leito por deslizamento, com impactos angulares de baixa intensidade ao longo das pás. As pás sofreram erosão por deslizamento em torno da periferia.

#### 6.1.1 Rotor em aço inoxidável

Segundo o fabricante (KSB), o rotor analisado foi fabricado segundo a norma A743 (*Standard Specification for Castings, Iron-Chromium-Nickel, Corrosion Resistant, for General Application*), com liga CF8M de aço inoxidável (KSB, 2008). Para as especificações subentende-se uma alta resistência à corrosão (C), elevada tenacidade, teores de Cr e Ni na ordem de 18% e 9% (F) respectivamente, com no máximo 0,08% de C (8) e revelando o molibdênio em sua composição química (M).

É um rotor de 7 pás, fechado de 400 mm, fluxo único, 2 estágios, podendo operar a 1180 rpm, com uma vazão de 300  $\ell/s$ , de uma bomba KSB, modelo B22. Este rotor trabalhou por 3 anos consecutivos na EEAB da ETA Sobral I, com paradas eventuais para manutenção no sistema elétrico e mecânico. Segundo informações da equipe técnica, é a estação mais antiga, ainda em funcionamento na região. Os filtros da torre de elevação estão desativados, o que permite entrada de material particulado de diferentes granulometrias.

Analisando o referido rotor, pode-se observar que a entrada da pá recebeu a maior parte dos danos, apresentado maior perda de material estrutural do rotor, conforme mostrado na FIG. 6.1 (a e c). Essa região é responsável pelo “corte” da água, recebendo impacto direto com as partículas em suspensão, sofrendo pequenas trincas por fadiga cíclica de baixo impacto, deixando a região mais vulnerável a erosão e corrosão. Já a variação da profundidade do desgaste pode ser explicada pela variação na estrutura do aço, durante o processo de fundição do rotor.



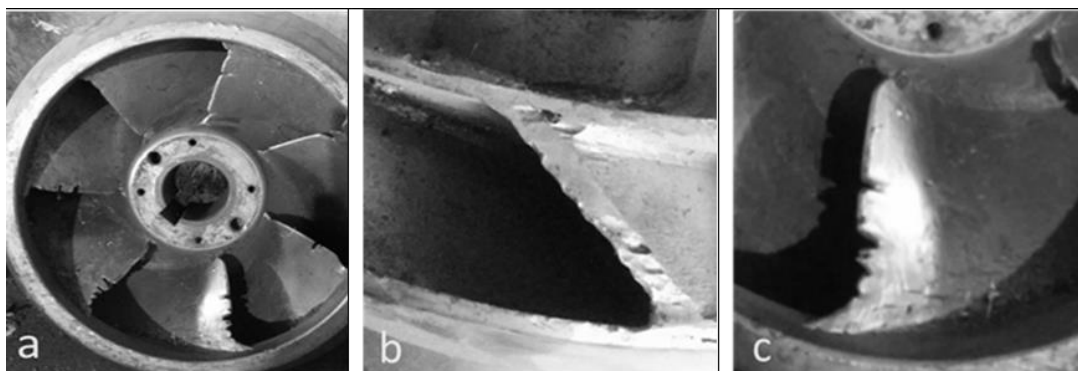


FIGURA 6.1 – Desgaste por abrasão de sedimentos em um rotor fechado de bomba centrífuga (KSB): a) Vista frontal do rotor; b) Saída do rotor; c) Zona de cisalhamento da pá

Também foi possível observar que a estrutura de aço inoxidável desse rotor, proporciona boa resistência à corrosão, mostrando boa resistência ao efeito abrasivo dos sedimentos em suspensão da água.

#### 6.1.2 Rotor em ferro fundido

Segundo o fabricante (FLYGT, 2004), o rotor foi fabricado em ferro fundido nodular (FIG. 6.2), sobre um anel de desgaste em aço inoxidável, montado firmemente na parte inferior da bomba Flygt, modelo M 3300 e apresenta uma estrutura para evitar entupimento.

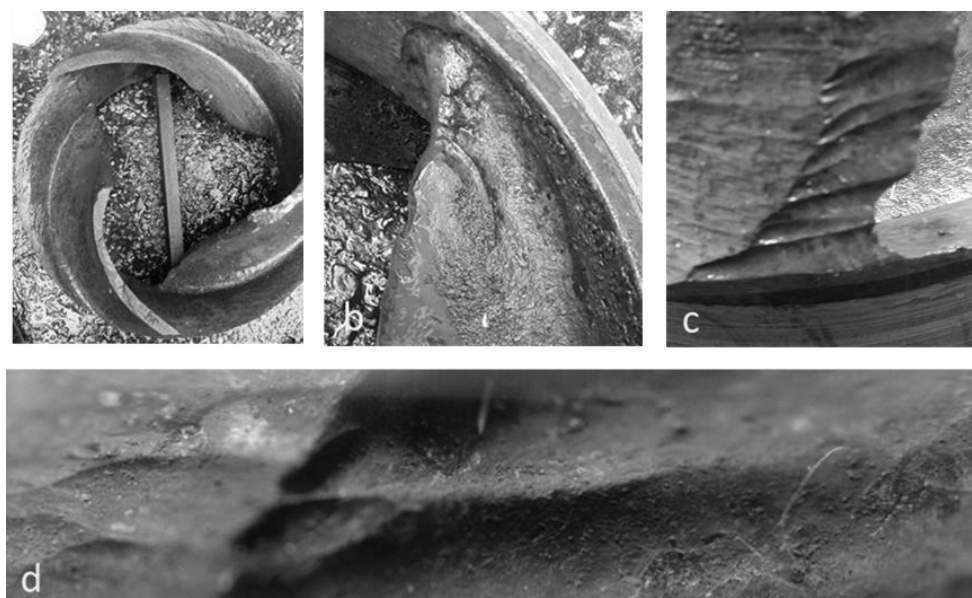


FIGURA 6.2 – Desgaste por abrasão de sedimentos em um rotor aberto de bomba centrífuga (Flygt): a) Vista frontal da parte posterior do rotor; b) Zona de cisalhamento da pá; c) Desgaste da zona de saída do rotor; d) Sulcos de desgaste na saída do rotor

A zona de cisalhamento apresentou uma deformação mais uniforme, possivelmente devido à capacidade de absorção de impacto do ferro fundido (FIG. 6.2b). Ou seja, a região apresenta-se deformada em função do impacto, porém sem perda de material decorrente de fraturas, como o ocorrido com o rotor em aço inoxidável e sim por microssulcos de desgaste.

A FIG. 6.3 mostra a ocorrência de partículas abrasivas incrustadas na liga metálica do rotor utilizado na EEAB, demonstrando que o impacto é suficiente para que ocorra a penetração de algumas partículas.



FIGURA 6.3 – Duas ampliações que mostram a incrustação de quartzo em uma pá do rotor de bomba centrífuga, proveniente do sedimento que foi bombeado

Os detalhes apresentados na FIG. 6.2d também mostram diferentes profundidades dos sulcos de desgaste, provavelmente decorrente das alterações das correntes em função da alteração do perfil da pá provocado pelo desgaste. Fora da zona de cisalhamento, as partículas erosivas seguem um padrão de fluxo mais linear ao longo das pás, apresentando um aprofundamento gradual dos sulcos de desgaste, aprofundando-se mais nos bordos de fuga das pás (DUAN & KERELIN, 2002)

## 6.2 Características construtivas do rotor.

Para determinar as características do rotor, foi considerada a necessidade da EEAB da ETA II, que trabalham com bombas com vazão de 1080 m<sup>3</sup>/h (300 ℓ/s) impulsionados por um motor elétrico com rotação de 1180 rpm e uma altura de elevação de 18,11 m. Considerando as perdas decorrente das peças hidráulicas na ordem de 6,54m, optou-se por adotar uma elevação de 25 mca de elevação equivalente. Os resultados podem ser observados na TAB. 6.1 e FIG. 6.4.

TABELA 6.1

Características construtivas calculadas a partir do algoritmo de Palomino (2017).

Características construtivas do rotor.	
Diâmetro de entrada do rotor (d1)	312 mm
Diâmetro de saída do rotor (d2)	408 mm
Ângulo da pá na entrada do rotor ( $\beta_1$ )	17,45°
Ângulo da pá na saída do rotor ( $\beta_2$ )	23°
Largura da pá na entrada do rotor (b1)	99 mm
Largura da pá na saída do rotor (b2)	63 mm
Espessura das pás	6 mm
Número de pás	7
Velocidade meridional na entrada do rotor (vm1)	4,89 m/s
Velocidade meridional na saída do rotor (vm2)	4,27 m/s
Velocidade periférica na entrada do rotor (u1)	15,57 m/s
Velocidade periférica na saída do rotor (u2)	25,18 m/s
Velocidade relativa na entrada do rotor (w1)	16,31 m/s
Velocidade relativa na saída do rotor (w2)	10,94 m/s

Fonte: próprio autor.

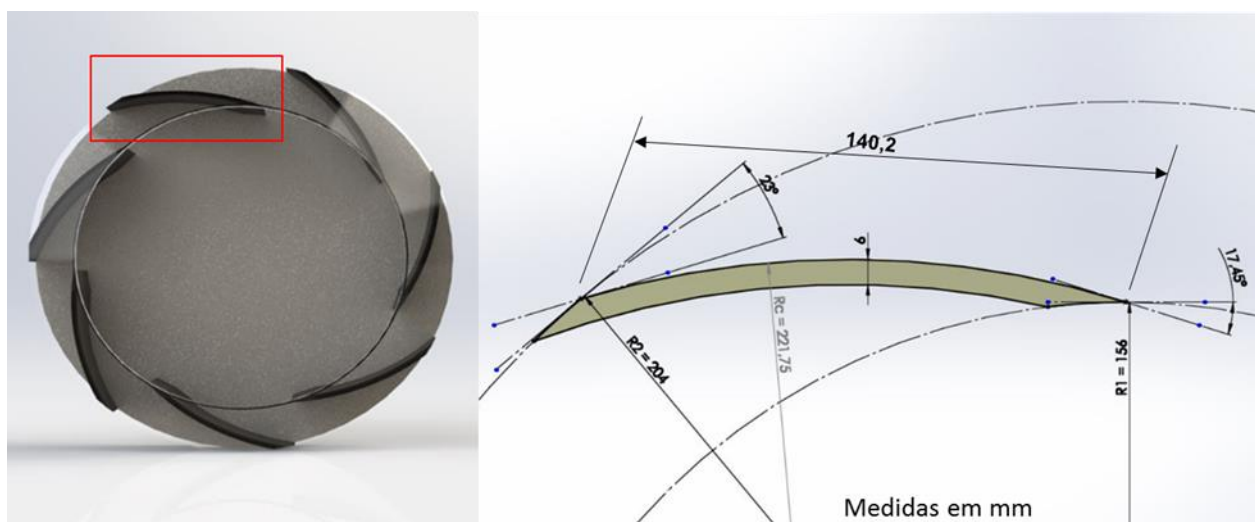


FIGURA 6.4 – Projeto do rotor com base nas características construtivas geradas pelo algoritmo

Na FIG. 6.5 pode-se observar os vetores de velocidade na entrada e na saída do rotor, de forma ilustrativa, demonstrado como foram determinadas as velocidades relativas na entrada e na saída do rotor.

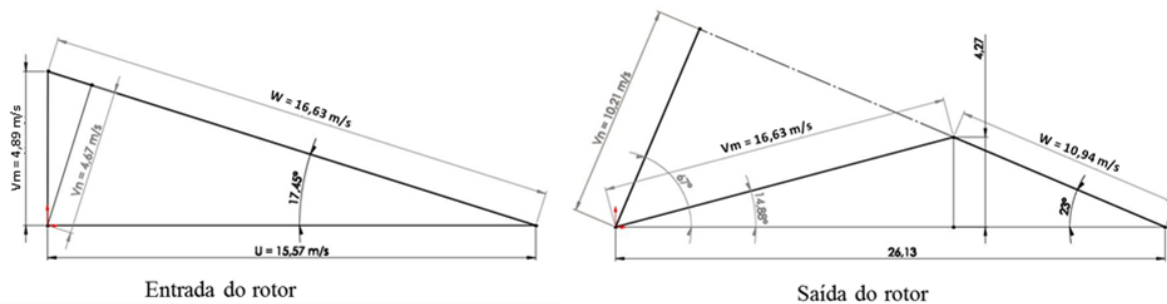


FIGURA 6.5 – Vetores de velocidade na entrada e na saída do rotor de projeto

Pode-se observar que a velocidade relativa na saída do rotor é menor que na entrada, o que diminui as perdas por atrito. Isso é possível em razão da área do perfil saída pá do rotor ser maior que o perfil da entrada, como poder ser observado na FIG. 6.5.

### 6.3 Campos de velocidade do rotor de referência

Com as características apresentadas na TAB. 6.1 e do triângulo de velocidade (FIG. 6.5), foram determinadas as velocidades relativas do fluido em relação às pás do rotor. Em seguida foram simuladas 5 condições, onde se manteve a vazão ( $Q$ ), a rotação específica ( $nq$ ), para relacionar a rotação ( $n$ ) da bomba em função da variação da altura elevação ( $H$ ) decorrente da variação no nível do rio Acre, onde foram obtidos os seguintes resultados (TAB. 6.2):

TABELA 6.2

Variação das velocidades do fluido em função da diminuição da rotação da bomba

	100%	95%	90%	85%	80%
	1180rpm	1121rpm	1062rpm	1003rpm	944rpm
vm1 [m/s]	4,89	4,73	4,56	4,39	4,22
vm2 [m/s]	4,27	4,13	3,98	3,84	3,68
u1 [m/s]	15,57	14,79	14,01	13,23	12,46
u2 [m/s]	25,18	24,34	23,49	22,61	21,72
w1 [m/s]	16,32	15,77	15,21	14,65	14,07
w2 [m/s]	10,94	10,57	10,20	9,82	9,43

Considerando que as velocidades que influenciam a força de arrasto ( $F_D$ ) aplicada sobre uma seção da pá, o gráfico apresentado no GRA. 6.1, mostra a variação dessas velocidades em função da variação da rotação (rpm) do rotor da bomba.

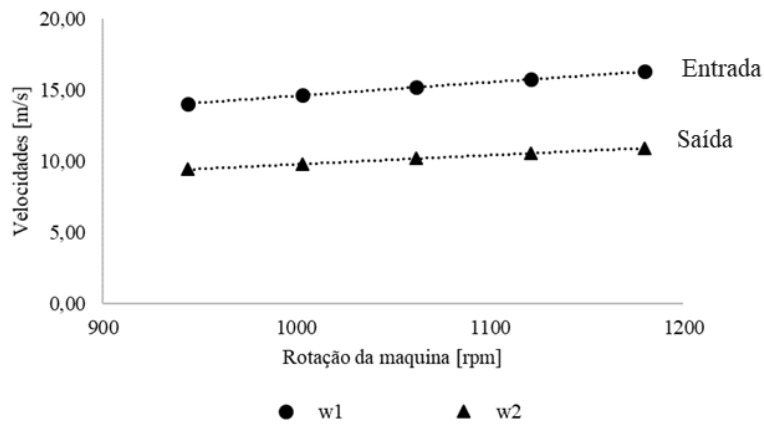


GRÁFICO 6.1 – Variação da velocidade relativas ( $w$ ) em função da variação da rotação da bomba:  $w_1$  entrada e  $w_2$  saída.

Neste caso, pode-se observar que quanto menor for a rotação, menor será a velocidade relativa da mistura (água + sedimento) em relação as pás do rotor, tanto na entrada, quanto na saída.

#### 6.4 Determinação das forças aplicadas na pá

Considerando as informações encontradas pelo algoritmo de Palomino (2017), apresentados na TAB. 6.2 e no GRA. 6.1, determinou-se um perfil de pá de projeto, para determinação da área de atuação das forças de arrasto abrasivo, responsáveis por pressionar as partículas abrasivas dos sedimentos diluídos na água bombeada sobre a superfície da pá (FIG. 6.6).

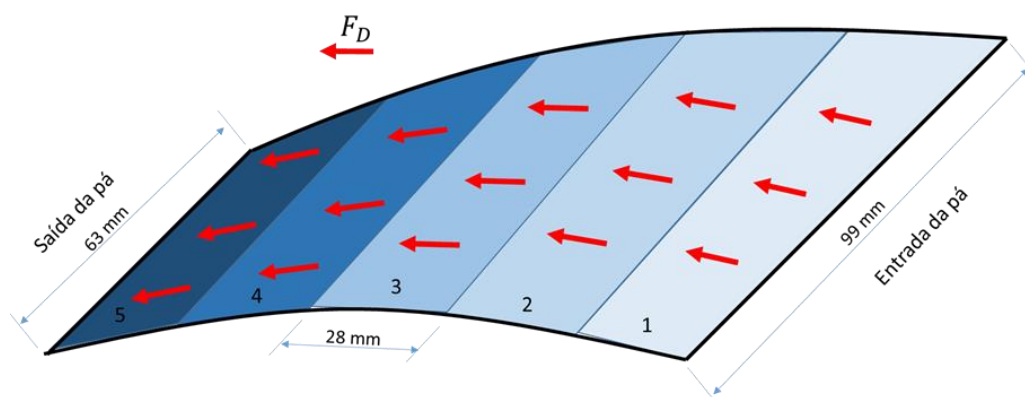


FIGURA 6.6 – Representação das 5 seções, para estimativa de desgaste

Conforme ilustrado na GRA. 6.2 e na TAB. 6.3, a  $F_D$  varia em função do raio do rotor e de cada seção da pá. Dessa forma, pode-se observar que as forças em função da velocidade relativa ( $w$ ) são maiores na seção 2, com tendência de diminuição em direção a saída da pá.

TABELA 6.3  
Variação das forças em função da área da seção

Sec	Área de cada seção da pá				Variação das forças sobre a pá				
	b'1 [mm]	b'2 [mm]	x [mm]	A [mm <sup>2</sup> ]	A [m <sup>2</sup> ]	w [m/s]	Reynolds	$C_D$	$F_D$ [N]
1	99	91,8	28,1	2675,8	2,68E-03	15,78	4,41E+05	2,00E-03	0,67
2	91,8	84,6	56,1	2473,8	2,47E-03	14,71	8,23E+05	2,75E-03	0,74
3	84,6	77,4	84,1	2271,9	2,27E-03	13,63	1,14E+06	3,04E-03	0,64
4	77,4	70,2	112,2	2069,9	2,07E-03	12,55	1,40E+06	3,14E-03	0,51
5	70,2	63	140,2	1868,0	1,87E-03	11,48	1,60E+06	3,17E-03	0,39

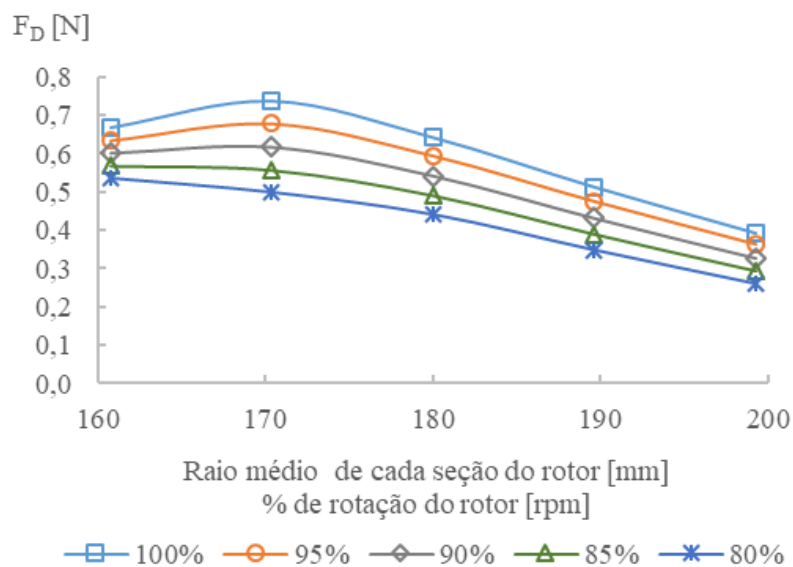


GRÁFICO 6.2 – Variação da  $F_D$  em função do raio de cada seção do rotor e da variação da rotação de 80% à 100%.

Considerando que a força de atrito está diretamente relacionada com perda de carga, já era esperado que o perfil da pá de projeto levasse em consideração a redução da  $F_D$  na direção do bordo de saída da curvatura da pá, conforme visto na GRA.6.2.

## 6.5 Análise das amostras das ligas metálicas.

As amostras adquiridas foram usinadas para padronização da espessura dos corpos de prova, ficando com as seguintes dimensões:

- Ferro fundido cinzento (60 HRA) – disco de  $\varnothing 50\text{mm}$  x 6mm de espessura;
- Ferro fundido nodular (62 HRA) – retângulos de  $\approx 10\text{mm}$  x 30mm x 6 mm
- Aço SAE 8620 (70 HRA) – Peças quadradas de 40mm x 40mm x 6mm

As amostras de ferro fundido cinzento passaram por um processo de têmpera e revenimento e a amostra de Aço SAE 8629 passou por tratamento têmpera e revenimento. Tais procedimentos foram necessários para alcançar a dureza das ligas utilizadas na fabricação dos rotores estudados. As amostras de ferro fundido nodular foram retiradas de um rotor original.

Tais amostras foram analisadas no espectrômetro de emissão ótica, onde obteve-se as seguintes características (TAB. 6.4):

TABELA 6.4  
Composição química das ligas metálicas

FoFo Cinzento	C	Si	S	P	Mn	Cu	Cr
	2,742	2,581	0,029	0,103	0,143	0,035	0,042
FoFo Nodular	C	Si	S	P	Mn	Cu	Cr
	3,697	2,922	0,006	0,026	0,210	0,048	0,018
Aço SAE 8620	C	Si	S	Mn	Cr	Ni	Mo
	0,766	0,264	0,013	0,782	0,461	0,495	0,167

Na FIG.6.7, são apresentados detalhes das ligas metálicas que foram ensaiadas, onde pode-se observar a ocorrência de algumas imperfeições decorrente do processo de fundição e tratamento.

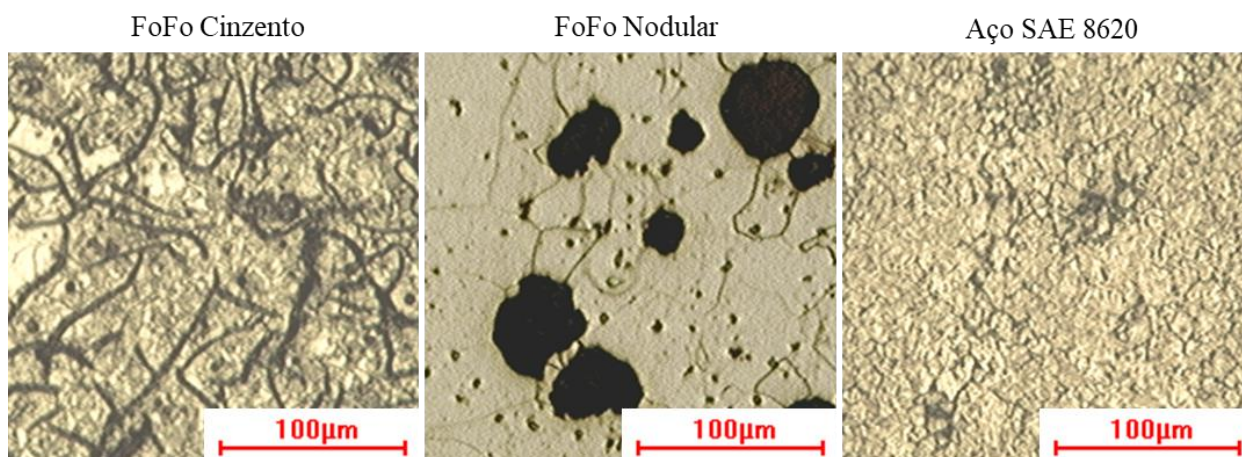


FIGURA 6.7 – Análise metalográfica das ligas metálicas utilizadas nos *ensaios*

Após o ataque químico, as imagens metalográficas indicaram que:

- O ferro fundido com ataque de nital à 2% (Ácido nítrico + Etanol 98%), apresentou veios de grafita em matriz perlítica.
- O ferro fundido nodular com ataque nital à 2% (Ácido nítrico + Etanol 98%), apresentou matriz perlítica, com microestrutura de nódulos de grafita conhecida por “olho de boi”
- O Aço SAE 8620 com ataque de nital a 2% (Ácido nítrico + Etanol 98%), apresentou traços de martensita (estrutura acicular) e com grande quantidade de poros.

Nessa análise, também se observou a presença de inclusões nas amostras de FoFo Cinzento e a presença de nódulos regulares, classe VI, nas amostras de FoFo Nodular.

## 6.6 Análise dos sedimentos erosivos do Rio Acre.

As partículas bombeadas pelos rotores podem apresentar diferenças de granulometria e concentração em virtude do efeito de turbulência na entrada dos dutos de captação das referidas estações elevatórias, por apresentar leve efeito de dragagem. No caso das amostras coletadas no tanque de desarenação, logo após o bombeamento, apresentaram concentração de 60% da carga de sedimentos com granulometria variando de 0,075 mm a 0,420 mm, sendo que 1,36% apresentam granulometria superior a 0,420 mm e o restante, 40,35% com granulometria abaixo de 0,075 mm, conforme pode ser observado no GRA. 6.3 e FIG. 6.8, sendo que o diâmetro D50 foi de 0,097 mm.



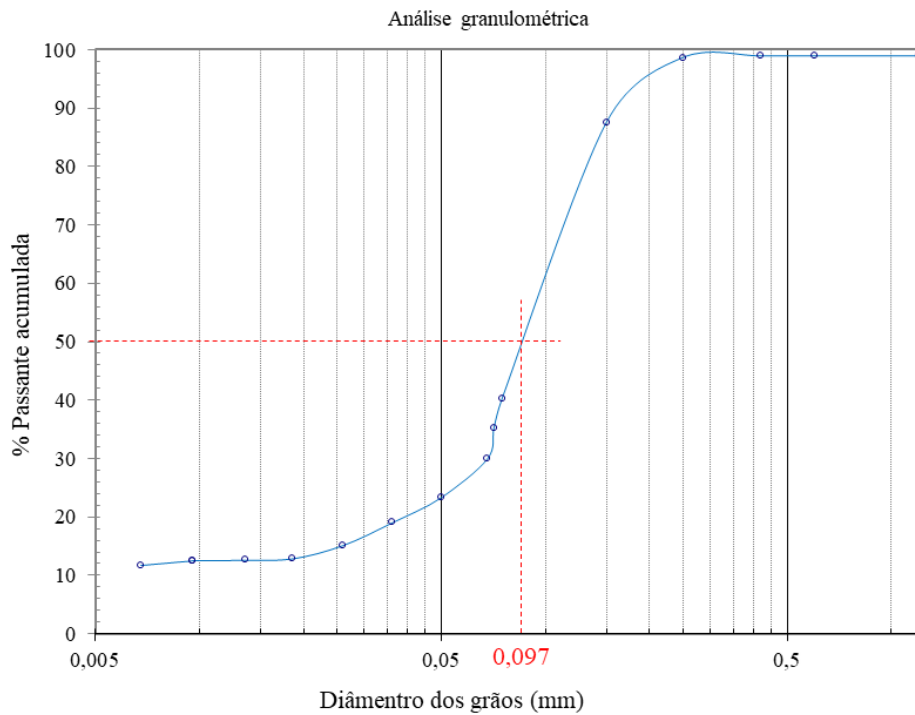


GRÁFICO 6.3 – Distribuição granulométrica de sedimentos do rio Acre, dragados pela EEAB

Os sedimentos apresentaram classificação granulométrica de areia muito fina a fina, conforme tabela de escala de tamanho apresentado por Wentworth (1922), ou simplesmente areia ABNT-NBR 6502 (1995).

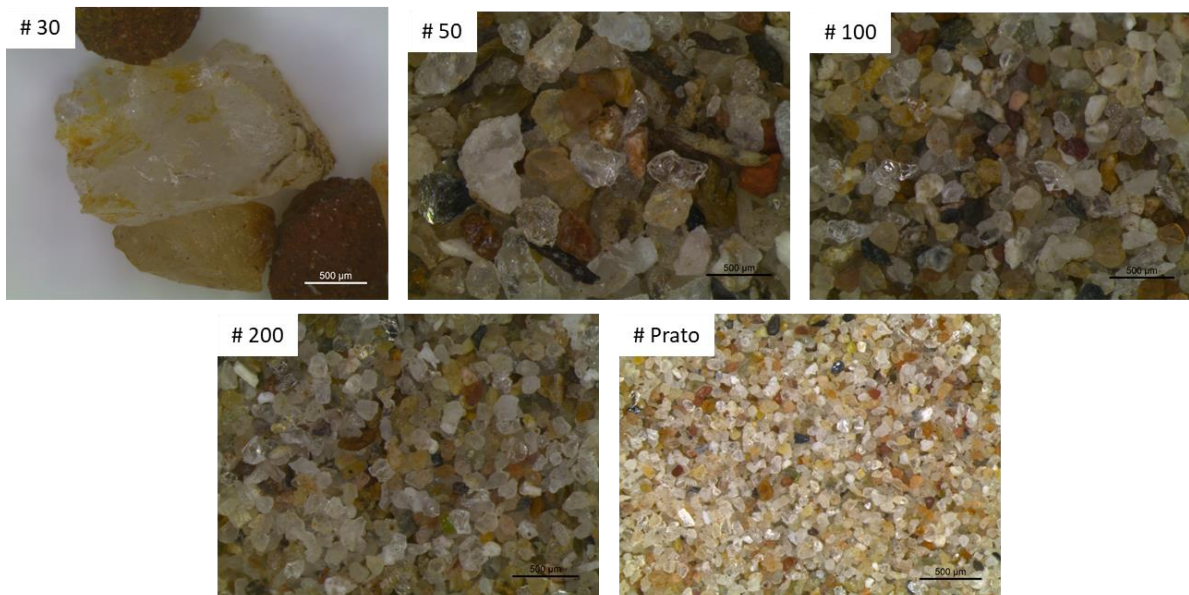


FIGURA 6.8 – Morfologia classificada dos sedimentos erosivos presentes nas águas do Rio Acre, coletados do tanque de desarenação da ETA II.

Segundo as medidas realizadas no ImgeJ, classificou-se os grãos de sedimentos como semiangulares a semiarredondados, característicos de solos jovens e arenosos. Tais características sinalizam para um alto poder abrasivo em razão das pontas afiadas e da grande quantidade de grãos de quartzo com dureza de 4 a 6 na escala Mohs.

## 6.7 Ensaio de abrasão por esfera rotativa e análise das calotas

### 6.7.1 1ª etapa: Determinação da força aplicada durante o ensaio

O aumento da taxa de desgaste em função da força aplicada na esfera tende a ser linear (BOSE & WOOD, 2005), entretanto, é necessário determinar a força capaz de imprimir no corpo de prova uma calota factível de ser medida, na menor concentração de abrasivo e para uma distância de rolagem relativa fixa de 180 m e rotação constante de 100 rpm.

A análise da taxa de desgaste ( $Q$ ) em função da variação da  $F_N$  (GRA. 6.4), para cada uma das amostras analisadas, apresentou comportamento semelhante ao o padrão observado por Bose e Wood (2005) e por Cozza (2011), indicando, preliminarmente, maior resistência do Aço SAE 8620 ao desgaste abrasivo para a concentração de sedimento de 1 g/l.

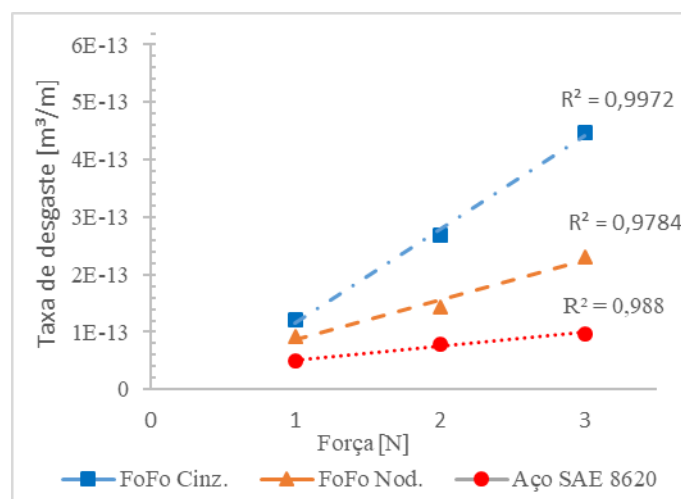


GRÁFICO 6.4 – Variação da taxa de desgaste ( $Q$ ) em função da variação de  $F_N$ .

O aumento da taxa de desgaste em função do aumento da  $F_N$  nos ensaios de microabrasão por esfera rotativa (GRA. 6.4), bem como seu comportamento linear, apresentam forma condizente com o comportamento linear relatados por: Allsopp & Hutchings, 2001; Ribeiro, 2004; Bose & Wood, 2005; Cozza, 2011; Fernandes *et al.*, 2012; Cozza *et al.*, 2015.

Com o intuito de analisar a hipótese que os resultados obtidos convergem para variação significativa do diâmetro da calota em função da variação da  $F_N$  foi adotado o teste F para a análise de variância (ANOVA) em esquema fatorial, aos níveis de significância 1% e 5% (TAB. 6.5). Os pressupostos básicos para a Anova foram devidamente verificados (PIMENTEL-GOMES, 2009). Os resultados apontam evidências para a não rejeição da hipótese de que um incremento na carga aplicada sobre a esfera rotativa ( $F_N$ ) aumentou significativamente o diâmetro da calota, conforme é exibido na FIG. 6.9.

TABELA 6.5

Análise de variância (ANOVA) da variação do diâmetro da calota em função da  $F_N$  e do tipo de material da amostra.

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Média dos quadrados	Teste F
Fator $F_N$ (F1)	2	1135660,2	567830,1	100,48 **
Fator tipo amostra (F2)	2	1358420,4	679210,2	120,20 **
Interação (F1 x F2)	4	145421,2	36355,3	6,43 **
Tratamentos	8	2639501,9	329937,7	58,38 **
Resíduo	18	101711,5	5650,6	
Total	26	2741213,4		

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < 0,01$ )

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $0,01 \leq p < 0,05$ )

Considerando que o teste F da Anova identificou que pelo menos dois diâmetros diferem significativamente entre si, em função da  $F_N$ , aplicou-se o teste de Tukey para identificar os ensaios com diferença mínima significativa (dms) ao nível de 5% de probabilidade.

Analisando a TAB. 6.6, onde as médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si, observou-se o significativo aumento do diâmetro das calotas nos ensaios realizados no FoFo cinzento e Nodular nas três cargas aplicadas, diferentemente dos ensaios realizados no Aço ASI 8620, que não apresentaram aumento significativo com a variação de 2N para 3N.

TABELA 6.6

Análise do aumento do diâmetro em função de  $F_N$  e do tipo material da amostra, pelo teste de Tukey

Forças	Diâmetro médio das calotas [ $\mu\text{m}$ ]		
	FoFo Cinz	FoFo Nodular	Aço ASI 8620
1N	1468,74 cA	1395,76 cA	1171,24 bB
2N	1929,44 bA	1737,66 bB	1334,14 aC
3N	2173,50 aA	1899,33 aB	1447,83 aC

dms para colunas = 156,67 (Classificação com letras minúsculas)  
dms para linhas = 156,67 (Classificação com letras maiúsculas)  
Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Para demonstrar a tendência do coeficiente de desgaste ( $K$ ) não apresentar diferença significativa para um determinado material e abrasivo, aplicou-se novamente a Anova e o teste F e verificou-se diferença significativa de  $K$  em função  $F_N$  (TAB. 6.7), cuja diferença foi identificada por meio do teste de Tukey.

TABELA 6.7

Análise de variância (ANOVA) da variação do coeficiente de desgaste ( $K$ ) em função do  $F_N$  e do material da amostra.

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Média dos quadrados	Teste F
Fator $F_N$ (F1)	2	2549,2	1274,6	3,9 *
Fator tipo amostra (F2)	2	48010,7	24005,3	73,4 **
Interação (F1 x F2)	4	4314,1	1078,5	3,3 *
Tratamentos	8	54873,9	6859,2	21,0 **
Resíduo	18	5879,7	326,6	
Total	26	60753,7		

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < 0,01$ )

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $0,01 \leq p < 0,05$ )

Pelo teste de Tukey (TAB. 6.8), observou-se que a diferença significativa ficou restrita à variação de  $K$  para 1N nos ensaios realizados no FoFo cinzento e sem diferença significativa para os ensaios para 2N e 3N. Já nos ensaios realizados com FoFo nodular e Aço SAE nos 3  $F_N$ , não mostraram diferença significativa para nenhuma das 3 forças utilizadas nos ensaios, confirmando a tendência retilínea apresentada no GRA, 6.4.

TABELA 6.8

Análise do K em função de  $F_N$ , pelo teste de Tukey

Forças	Coeficiente de desgaste ( $K$ ) $\times 10^{-15}$ [m <sup>3</sup> /Nm]		
	FoFo Cinz	FoFo Nodular	Aço SAE 8620
1N	102,45 bA	83,66 aA	41,51 aB
2N	152,31 aA	102,07 aB	34,66 aC
3N	162,51 aA	95,41 aB	31,96 aC

dms para colunas = 37,67 (Classificação com letras minúsculas)

dms para linhas = 37,67 (Classificação com letras maiúsculas)

Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Analisando as calotas e o padrão de desgaste em função da  $F_N$  (FIG. 6.9), é possível observar que as calotas impressas em função da  $F_N = 3N$  apresentaram melhor definição das bordas, facilitando a determinação do diâmetro.

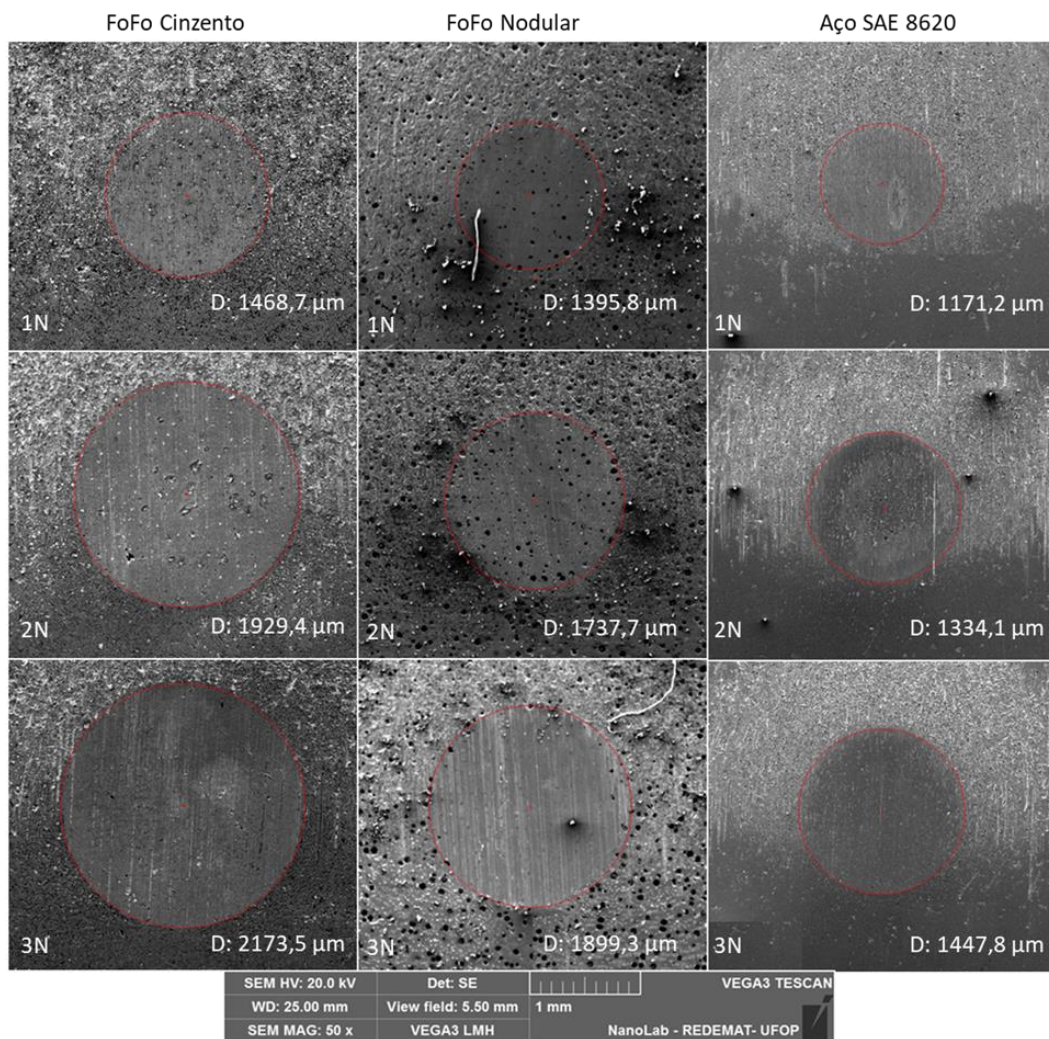


FIGURA 6.9 – Análise do delineamento das calotas de desgaste por imagem MEV

A partir do que é exibido na FIG. 6.10, observa-se que o padrão de desgaste não se alterou em função da  $F_N$ , mantendo-se o padrão de desgaste por sulcamento para as três ligas metálicas, com nítido direcionamento. Esses resultados refletem características semelhantes ao padrão de desgaste encontrado por Cozza *et al.* (2013), referente a concentrações de abrasivo menores de 18% e carga superior a 1N.

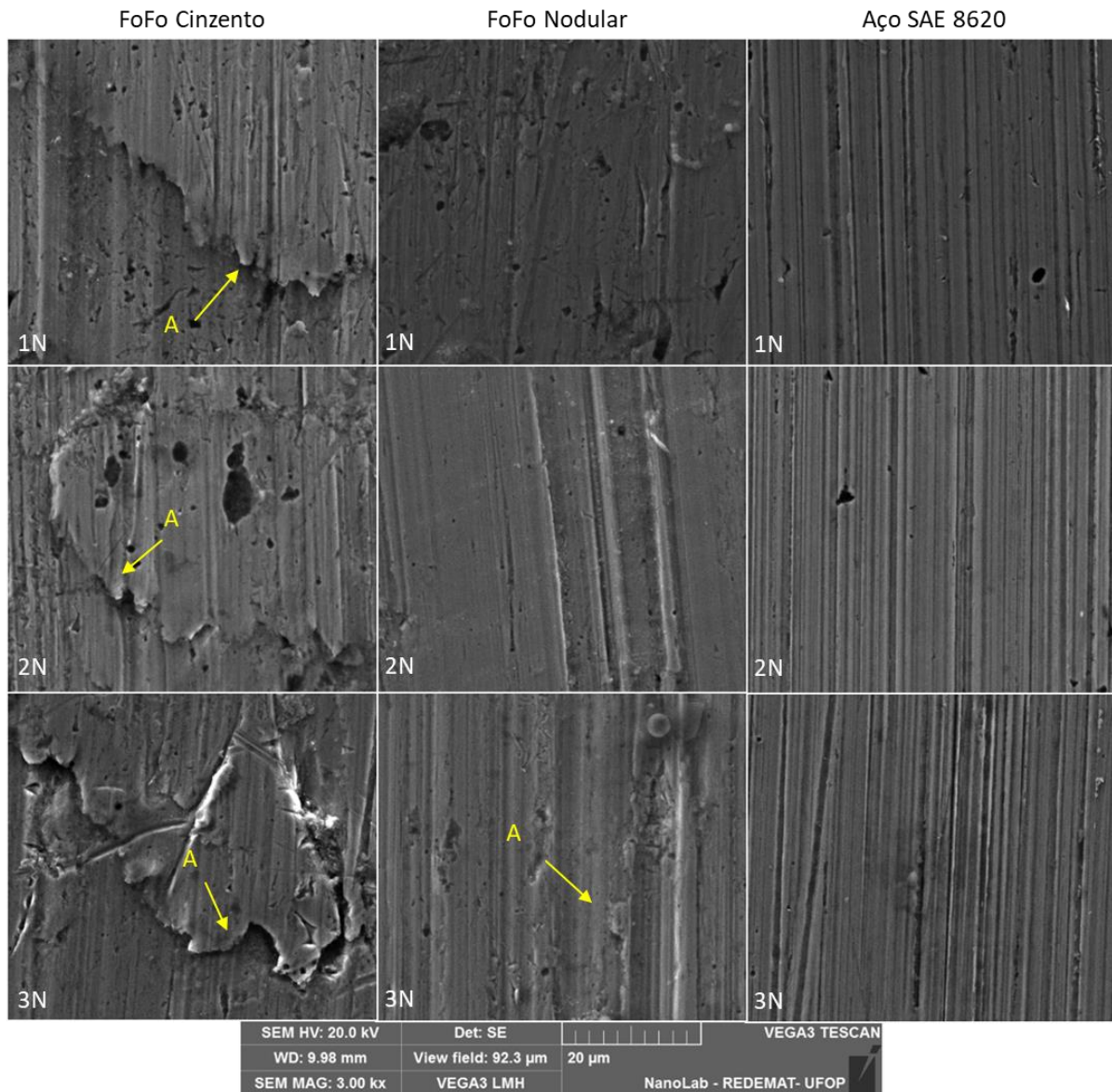


FIGURA 6.10 – Avaliação do padrão de desgaste em função do  $F_N$  (MEV). (A) Deformação plástica.

Além disso, observa-se a partir da FIG. 6.10, que o corpo de prova em FoFo cinzento apresentou áreas com nítidas deformações plásticas, com intensificação em função do aumento da  $F_N$ , com nítido acúmulo de material à frente dos sulcos de desgaste. O material acumulado nas bordas dos sulcos é

posteriormente removido pela associação dos mecanismos de microsulcamento com o mecanismo de fadiga de baixo ciclo, semelhante ao que foi observado por Pintaúde (2002).

### 6.7.2 2ª etapa: determinação do desgaste em função da carga de sedimento.

A partir dos diâmetros das calotas geradas nos ensaios de desgaste para as concentrações de sedimentos analisadas, calculou-se a taxa de desgaste ( $Q$ ) a partir da EQUAÇÃO (5.39) e o coeficiente de desgaste ( $K$ ) a partir das EQUAÇÃO (5.40), considerando  $F_N = 3N$  que foi determinado com base nos ensaios da 1ª etapa.

Para analisar a relação do  $K$  em função da concentração de sedimento na suspensão abrasiva, para cada um dos materiais analisados, foram traçadas curvas logarítmicas (GRA. 6.). Os valores de  $K$  na concentração de 0,5 g/l, foram calculados pela equação da curva, gerada experimentalmente para as concentrações de 1 g/l, 2 g/l, 3 g/l, 5 g/l e 10 g/l. Dessa forma, observou-se que o  $K$  aumentou em função do aumento da concentração de sedimento, para  $F_N = 3N$ , provavelmente em razão da maior quantidade de partículas abrasivas em contato entre a amostra e a esfera, resultando no maior desgaste (COZZA, 2011; TREZONA *et al.*, 1999; PINTAÚDE, 2002; KRELLING *et al.*, 2017).

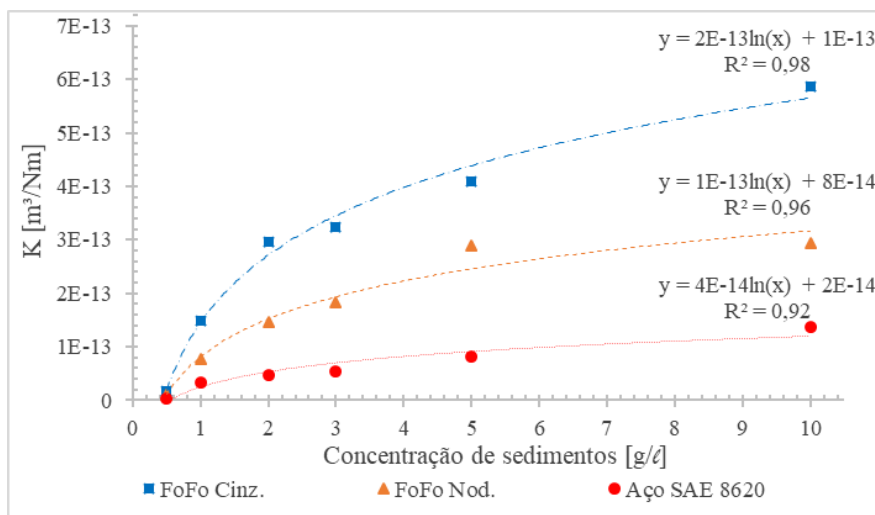


GRÁFICO 6.5 – Comportamento do coeficiente de desgaste específico ( $K$ ) em função da variação da concentração de sedimento, para as condições de ensaio ( $S = 180$  m e  $F_N = 3$  N).

Com o intuito de avaliar a hipótese que os resultados obtidos convergem para variação significativa do diâmetro da calota em função da variação da carga de sedimento, foi adotado novamente o teste  $F$  para análise de variância em esquema fatorial, aos níveis de significância de 1% e 5%, cujos

pressupostos básicos foram devidamente contemplados (PIMENTEL-GOMES, 2009). Os resultados apresentados na TAB. 6.9, apontam evidências para a não rejeição da hipótese de que o aumento da concentração de sedimento na solução abrasiva, aumenta significativamente o diâmetro da calota, que é diretamente proporcional ao aumento do volume desgastado. Essa análise também apresenta a confirmação estatística da maior resistência ao desgaste do Aço Sae 8620, seguido do FoFo Nodular e com menor resistência o FoFo Cinzento, como pode ser observado nas calotas impressas na FIG. 6.11.

TABELA 6.9

Análise de variância (ANOVA) da variação do diâmetro da calota em função da concentração de sedimentos na solução abrasiva e do tipo da composição da amostra.

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Média dos quadrados	Teste F
Fator concentração (F1)	4	2252496,30	563124,07	184,74 **
Fator tipo amostra (F2)	2	6354980,88	3177490,44	184,74 **
Interação (F1 x F2)	8	98810,40	12351,30	4,05 **
Tratamentos	14	8706287,58	621877,68	204,02 **
Resíduo	30	91443,50	3048,12	
Total	44	8797731,08		

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < 0,01$ )

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $0,01 \leq p < 0,05$ )

Pelo teste de Tukey (TAB. 6.10), confirmou-se a tendência do aumento do diâmetro em função do aumento da concentração de sedimentos na solução abrasiva, comprovando estatisticamente o que foi observado por: Cozza, 2011; Trezona *et al.*, 1999; Pintaúde, 2002; Krelling *et al.*, 2017

TABELA 6.10

Análise do diâmetro das calotas em função de da concentração de sedimentos, pelo teste de Tukey.

Forças	Diâmetro das calotas [ $\mu\text{m}$ ]		
	FoFo Cinz	FoFo Nodular	Aço SAE 8620
1g/l	2173,50 dA	1899,33 dB	1447,83 dC
2g/l	2580,67 cA	2088,66 cB	1574,16 cdC
3g/l	2664,33 bcA	2259,33 bB	1660,00 cC
5g/l	2773,83 bA	2449,50 aB	1842,17 bC
10g/l	2929,50 aA	2518,00 aB	2016,50 aC

dms para colunas = 156,67 (Classificação com letras minúsculas)

dms para linhas = 156.67 (Classificação com letras maiúsculas)

Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

A FIG. 6.11, mostra a evolução do desgaste em função da concentração de sedimentos, bem como a diferença do diâmetro da calota em função do material do corpo de prova utilizado. A princípio, pode-



se observar que as marcas de desgaste produzidas são similares para os ensaios realizados com o mesmo material, independente da concentração abrasiva, verificando em todos os casos a presença de sulcos de desgaste característicos de ensaios abrasivos.

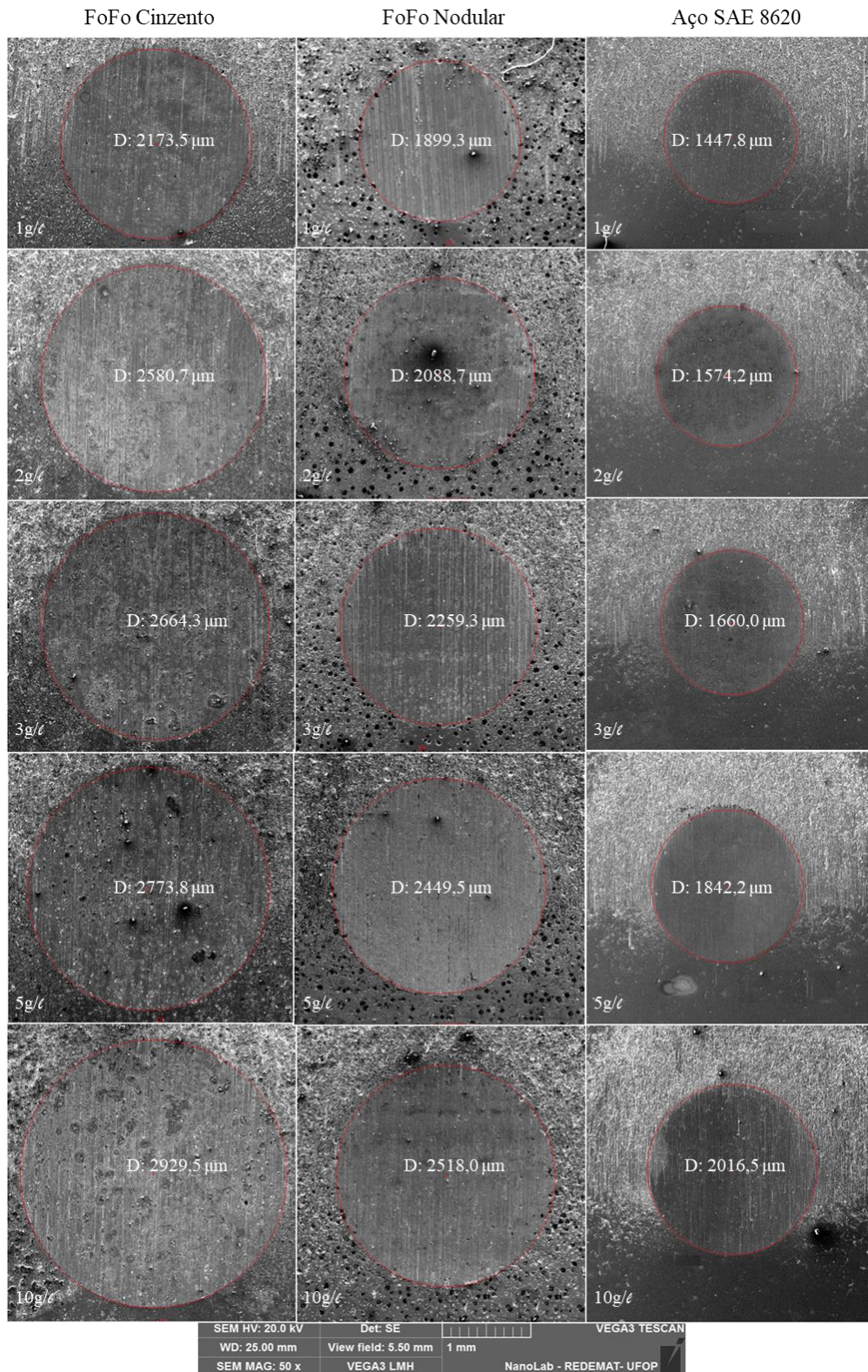


FIGURA 6.11 – Influencia da concentração de sedimentos no diâmetro da calota de desgaste (MEV)

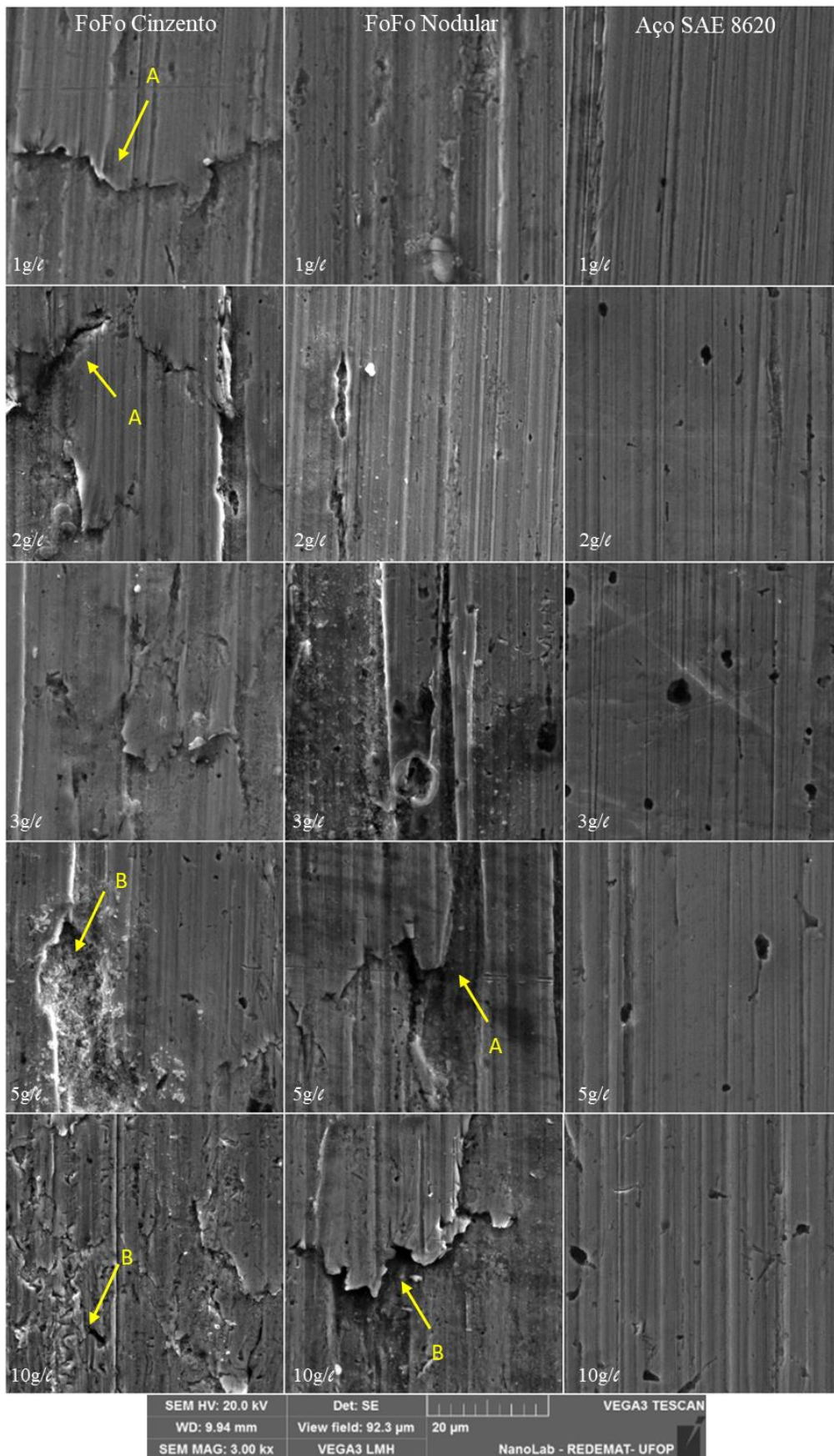


FIGURA 6.12 – Avaliação do padrão de desgaste em função da concentração de sedimentos (MEV). (A) Deformação plástica e (B) Pontos de arrancamento da dos acúmulos a frente dos sulcos.

A partir do que é exibido na FIG. 6.12, observa-se que o padrão de desgaste não se alterou em função da concentração de sedimentos, mantendo-se o padrão de desgaste por sulcamento para as três ligas metálicas, com nítido direcionamento. Esses resultados também refletem características semelhantes ao padrão de desgaste encontrado por Cozza *et al.* (2013), referente a concentrações de abrasivo menores de 18% e carga superior a 1N.

Além disso, observa-se na FIG. 6.12, que os corpos de prova em FoFo cinzento e nodular apresentaram áreas com nítidas deformações plásticas (A), com intensificação em função do aumento da concentração de sedimento, com nítido acúmulo de material à frente dos sulcos de desgaste e com maior intensidade de deformação no FoFo cinzento. Os materiais acumulados nas bordas dos sulcos são posteriormente removidos pela associação dos mecanismos de microssulcamento com o mecanismo de fadiga de baixo ciclo (B), semelhante ao que foi observado por Pintaúde (2002).

### 6.7.3 3ª etapa: comparação da abrasividade do sedimento com carboneto de silício

Para analisar a abrasividade do sedimento, comparou-se o desgaste ocasionado pela concentração de 10 g/l de sedimento com o desgaste ocasionado por um abrasivo de referência, Carboneto de silício (SiC), na mesma concentração de 10 g/l (FIG. 6.13)

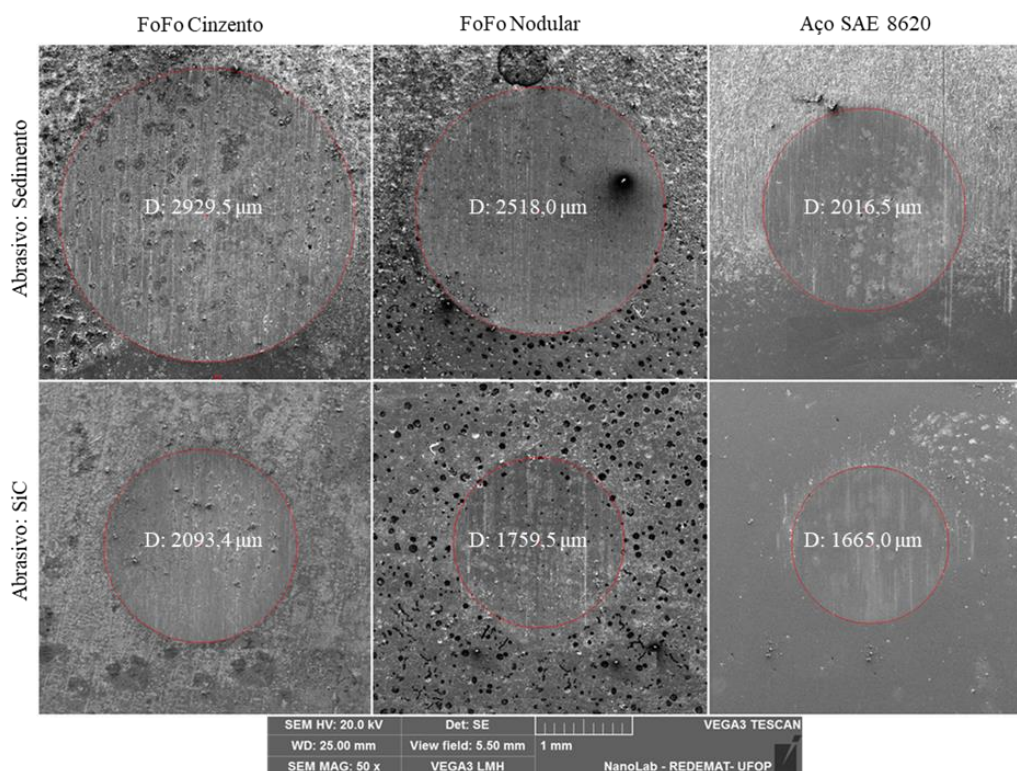


FIGURA 6.13 – Influencia do material abrasivo (Sedimento e SiC), no diâmetro da calota de desgaste

Para testar a hipótese que os diâmetros das calotas variam significativamente em função do material abrasivo, foi novamente adotado o teste F para análise de variância em esquema fatorial, aos níveis de significância de 1% e 5% e os pressupostos básicos para ANOVA foram devidamente contemplados (PIMENTEL-GOMES, 2009). Os resultados apresentados na TAB. 6.11, apontam evidências para a não rejeição da hipótese que o material abrasivo influenciou significativamente o diâmetro da calota, confirmando o maior desgaste ocasionado pelo sedimento. Essa análise também apresenta a confirmação estatística da maior resistência ao desgaste do Aço Sae 8620, seguido do FoFo nodular e com menor resistência para o FoFo cinzento, como já observado nas FIG. 6.11 e na FIG. 6.13.

TABELA 6.11

Análise de variância (ANOVA) da variação do diâmetro da calota do material abrasivo utilizado (sedimento e SiC) e do tipo da composição da amostra.

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Média dos quadrados	Teste F
Fator tipo abrasivo (F1)	1	1893646,12	1893646,12	295,42 **
Fator tipo amostra (F2)	2	1355200,87	677600,43	105,71 **
Interação (F1 x F2)	2	203193,56	101596,78	15,85 **
Tratamentos	5	3452040,55	690408,11	107,71 **
Resíduo	12	76919,13	6409,92	
Total	17	3528959,68		

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < 0,01$ )

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $0,01 \leq p < 0,05$ )

Os resultados também mostram (GRA. 6.6), que a diferença do volume desgaste entre o sedimento e o SiC variou entre os diferentes materiais dos corpos de prova, sendo de 380% no FoFo cinzento, 420% no FoFo nodular e 220% no Aço SAE 8620. Dessa forma, pode-se inferir que o sedimento do rio Acre, em média, é 340% mais abrasivo que o SiC.

Essa maior abrasividade do sedimento pode ser explicada pela irregularidade dos tamanhos das partículas de sedimentos e pelo  $D50 = 0,097$  mm, que é 6 vezes maior que as partículas do SiC ( $D50 = 0,016$  mm). Considerando a heterogeneidade da composição dos sedimentos de diferente bacias hidrográficas, a comparação com o desgaste produzido por um material de referência como o Carboneto de silício (SiC) se fez necessário, tendo em vista que é comumente encontrado na literatura em ensaios de desgaste abrasivo por esfera rotativa (GANT & GEE, 2011; FERNANDES *et al.*, 2012; COZZA, 2013; COZZA *et al.*, 2015; FARFÁN-CABRERA *et al.*, 2016; KRELLING *et al.*,

2017) Com base nisso será possível a comparação de abrasividade dos sedimentos de diferentes regiões.

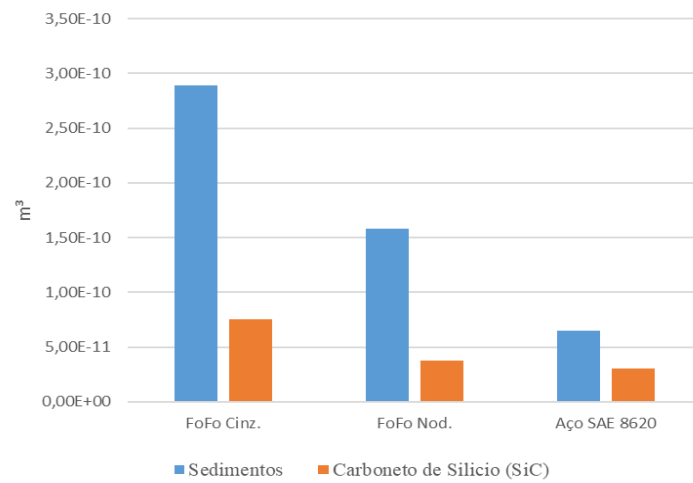


GRÁFICO 6.6 – Volume de desgaste em função do material abrasivo.

Na FIG. 6.14, observa-se que o padrão de desgaste por sulcamento com nítido direcionamento não se alterou em função do material abrasivo, entretanto notou-se a redução da deformação plástica nos ensaios com SiC no FoFo cinzento e no FoFo nodular.

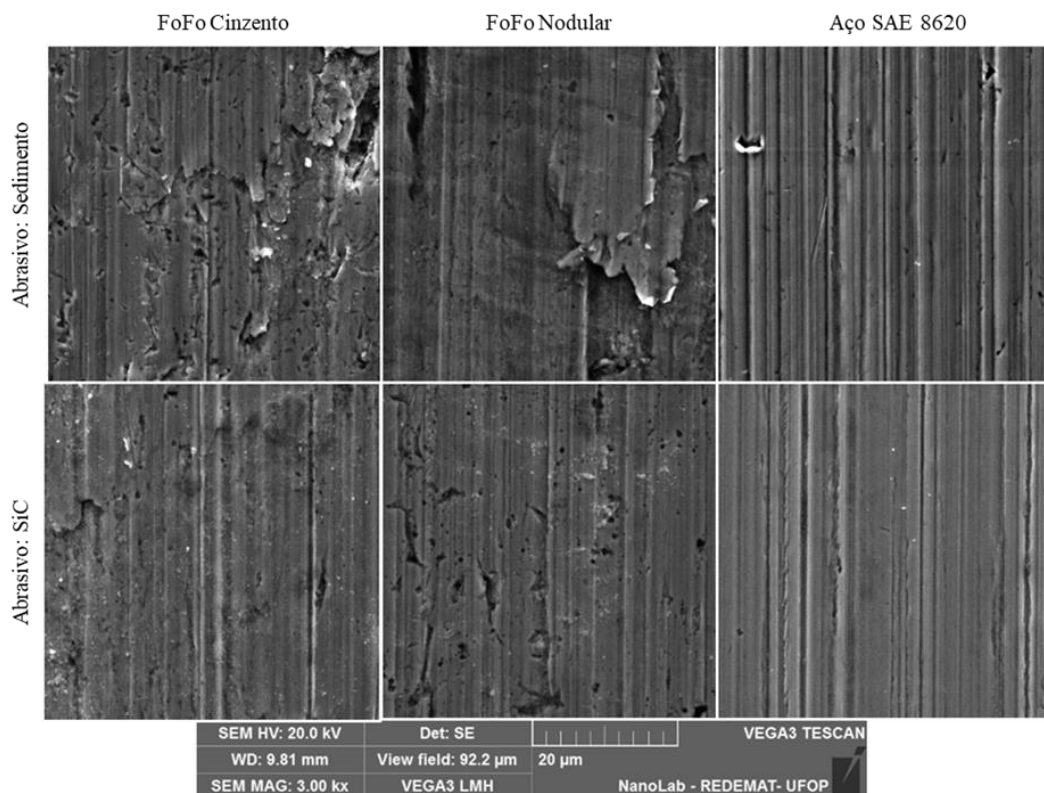


FIGURA 6.14 – Avaliação do padrão de desgaste em função do material abrasivo

## 6.8 Determinação do desgaste da pá

Considerando as velocidades relativas na entrada e na saída do rotor (TAB. 6.2), a variação de arrasto sobre as pás (TAB. 6.3) e a variação do  $K$  em função da carga de sedimento (GRA. 6.5), aplicou-se EQUAÇÃO (5.41) para estimar o volume de desgaste da pá em função da variação da carga de sedimento e da cota média mensal do Rio Acre (GRA. 6.7).

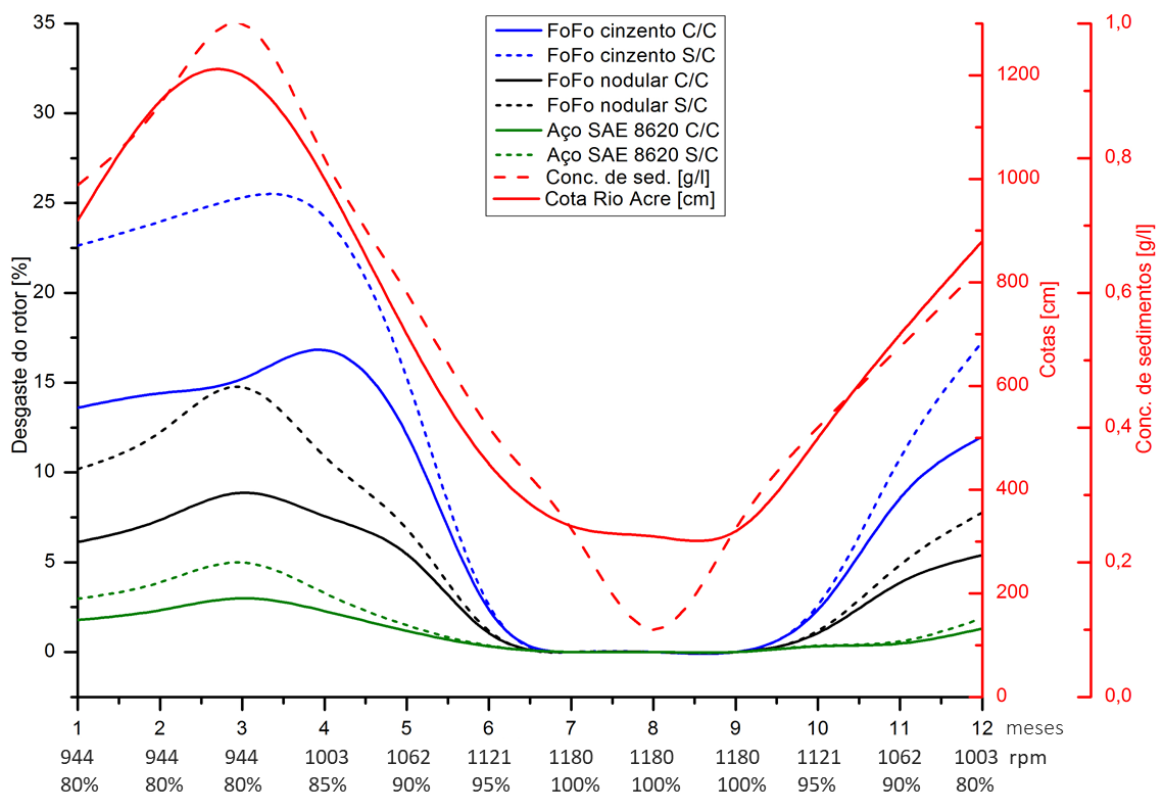


GRÁFICO 6.7 – Avaliação do desgaste da pá do rotor em função da variação da carga de sedimentos do Rio Acre: Com controle rotacional (C/C) e sem controle rotacional (S/C).

Como observa-se na FIG. 6.15, a não aplicação do controle rotacional da máquina, aproveitando a redução do  $\Delta H$  em função do aumento da cota do rio, pode acarretar um desgaste prematuro do rotor em razão do aumento da concentração de sedimento carregados pelas águas durante o período chuvoso.

No caso do estudo aqui apresentado, ao aplicar o controle rotacional, a velocidade relativa do fluido diminuiu, reduzindo a  $F_D$  sobre as pás do rotor, reduzindo também o desgaste, como pode ser observado no período de outubro de um ano ao mês de maio do ano seguinte (GRA. 6.7).

Ao observar o desgaste acumulado na GRA. 6.8 e considerando o limite de desgaste em 70% da espessura das pás do rotor, pode-se concluir que sem o controle rotacional seriam necessários 2 rotores em FoFo cinzento por ano ou 1 rotor em FoFo nodular, enquanto que os rotores em Aço 8620 poderiam rodar por quase 3 anos. Já com o controle rotacional esse desgaste pode ser reduzido em aproximadamente 33%, como pode ser observado na GRA. 6.9.

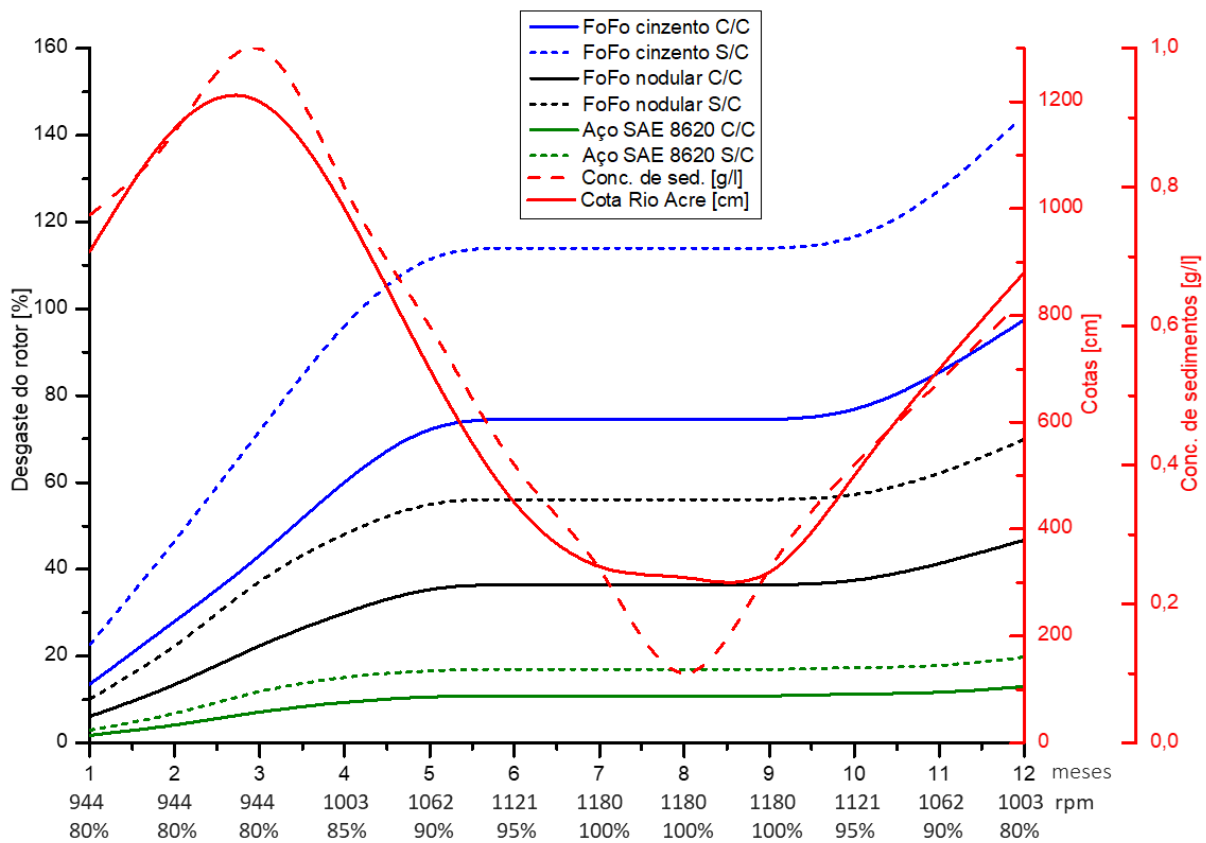


GRÁFICO 6.8 – Desgaste acumulado da pá do rotor em função da variação da carga de sedimentos do Rio Acre: Com controle rotacional (C/C) e sem controle rotacional (S/C).

Observando novamente na GRA. 6.9, verifica-se a maior resistência do Aço SAE 8620, sendo 7,3 vezes mais resistente que o FoFo cinzento e 3,5 vezes mais resistente que o FoFo nodular, enquanto que o FoFo nodular é 2 vezes mais resistente que o FoFo cinzento. Esses resultados reforçam os

resultados encontrados por Tian *et al.* (2005), que encontraram forte correlação do coeficiente de desgaste com a dureza do material.

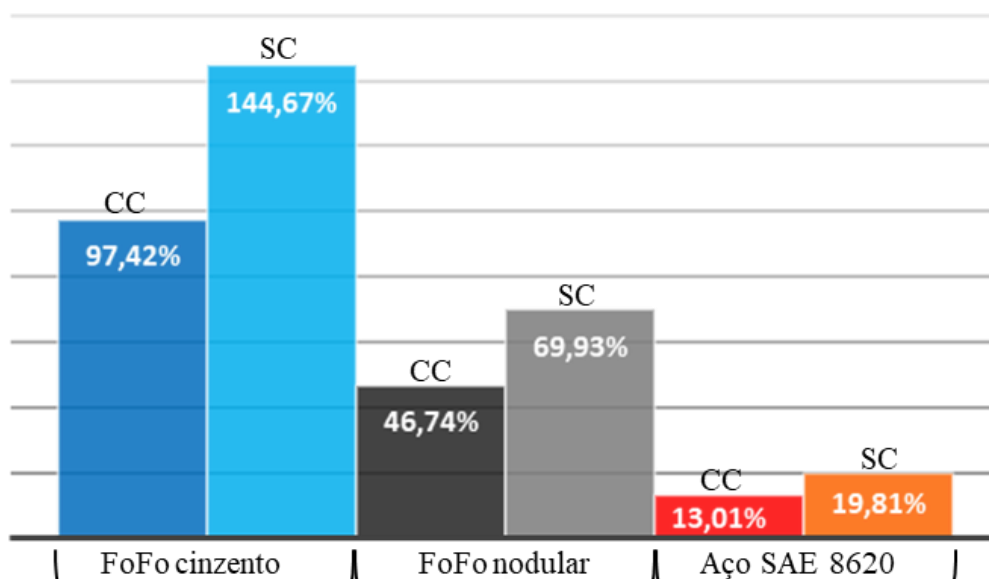


GRÁFICO 6.9 – Desgaste relativo da pá do rotor em 1 ano de trabalho: Com controle rotacional (C/C) e sem controle rotacional (S/C),

Vale salientar, que esta estimativa de desgaste foi para o rotor de projeto com pás de 6mm de espessura (TAB. 6.1). Levando-se em consideração que as amostras de FoFo nodular foram retiradas de um rotor Flygt com pás de 15 mm (FIG. 6.4) e que esses rotores apresentam vida útil de 2 anos EEAB (SERRANO et al., 2016), os resultados apresentados pela estimativa de desgaste (GRA. 6.7, 6.8 e 6.9), mostram-se coerentes, tendo em vista que as pás do rotor de projeto tem apenas a metade da espessura do rotor real.

### 6.9 Roteiro para implementação da técnica.

- 1ª. Análise semanal da concentração de sedimento.
- 2ª. Análise granulométrica dos sedimentos.
- 3ª. Análise da abrasividade do sedimento sobre material utilizado na fabricação do rotor.
- 4ª. Monitoramento da cota do rio.
- 5ª. Determinação da variação do  $\Delta H$  da estação elevatória em função da cota do rio.
- 6ª. Avaliação da redução da rotação em função da variação do  $\Delta H$ .
- 7ª. Determinação da velocidade relativa do fluido em relação a pá do rotor



- 8<sup>a</sup>. Determinação do coeficiente de arrasto em função das velocidades relativas
- 9<sup>a</sup>. Construção do gráfico do percentual de desgaste em função da carga de sedimento,  $\Delta H$  e rotação da bomba.
- 10<sup>a</sup>. Instalação de um inversor de frequência no sistema de bombeamento para controlar a rotação da bomba.
- 11<sup>a</sup>. Controlar a rotação da bomba em função da cota do rio

Obs.: Expectativa de aumento da vida útil do rotor em 30%

## 7 CONCLUSÕES

Os seguintes pontos podem ser destacados nessa pesquisa:

O regime de desgaste abrasivo e a reprodutibilidade dos resultados nas condições de ensaios, no presente trabalho, mostraram que os ensaios de microabrasão por esfera rotativa foram adequados para investigar a capacidade abrasiva dos sedimentos e o desgaste das ligas de FoFo cinzento, FoFo nodular e aço ASE 8620.

As formas semiangulares e semiarredondas dos sedimentos do rio Acre produziram evidências de microssulcamento e deformação plástica do material nas três ligas metálicas em todas as concentrações de sedimentos utilizadas nos ensaios. Isso mostra, que a dureza Mohs das partículas de areia quartzosa são capazes de ocasionar danos significativos em rotores de bombas, mesmo em baixas concentrações na água bombeada.

A capacidade abrasiva dos sedimentos mostrou-se evidente na formação das calotas de desgaste nas três ligas metálicas para as três cargas aplicadas, sendo menos intensa no aço SAE 8620, decorrente de sua maior dureza (70 HRA) e mais intensa no FoFo cinzento (60 HRA).

O bom delineamento das calotas permitiu o cálculo do coeficiente de desgaste específico  $K$  mesmo utilizando baixa concentração abrasiva (1 g/l) na menor carga aplicada (1N) durante os ensaios, mostrando a aplicabilidade de baixas concentrações em ensaios de microabrasão por esfera rotativa.

O coeficiente de desgaste específico  $K$  não apresentou diferença significativa em função da variação da  $F_N$  nos ensaios com abrasômetro de esfera rotativa, para um mesma liga metálica, abrasivo e concentração do abrasivo. Esta confirmação proporciona a utilização da curva de  $K$  em função da concentração de sedimento para qualquer força de arrasto abrasivo aplicado sobre a pá do rotor. Essa flexibilidade permite a variação contínua do  $K$  em função da variação da concentração de sedimento da água bombeada, que por sua vez, varia em função do regime fluviométrico.

Embora o coeficiente  $K$  não tenha apresentado diferença significativa em função da  $F_N$ , ele é diretamente influenciado pela concentração de sedimento com tendência de redução da sua taxa de

crescimento em concentrações maiores que 5g/l, mostrando a importância do monitoramento dessa variação em função da vazão e cota do rio utilizado na captação.

A análise do volume de desgaste, em função do tipo de liga metálica, da concentração do sedimento e da velocidade relativa nos rotores, mostrou a importância de um estudo prévio da concentração de sedimento nas fontes de água bombeadas por EEAB, bem como da variação da altura manométrica e da vazão requerida, para escolha do material utilizado na fabricação do rotor. Em fonte com variação de concentração de sedimento acima de 0,5 g/l, recomenda-se a utilização de rotores em Aço SAE 8620 por ser 3,5 vezes mais resistente ao desgaste abrasivo que o FoFo Nodular e 7,3 vezes mais resiste que o FoFo cinzento.

A análise da variação da rotação do rotor em função da variação da cota do rio e da variação da altura manométrica mostrou a possibilidade de redução do desgaste do rotor em até 30% em um ciclo hidrológico para as três ligas metálicas utilizadas nos ensaios, mostrando a importância do controle rotacional durante o processo de bombeamento.

Considerando que as três ligas metálicas apresentaram os percentuais de redução de desgaste idênticos em função do controle rotacional, mantendo-se o mesmo volume de água bombeado, sugere-se que tal controle pode ser adotado em EEAB de outras localidades que apresentem variação de carga de sedimento e de cota fluviométrica.

Os resultados aqui apresentados podem ser úteis para os operadores de estações elevatória de água bruta com variação da carga de sedimento e para diversos pesquisadores no estudo e desenvolvimento de rotores utilizados em bombas de captação de água bruta de bacias sedimentares, buscando obter materiais com maior resistentes ao desgaste abrasivo e que atendam às condições de bombeamento.

## 8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A avaliação da abrasividade dos sedimentos bombeados por EEAB foi analisada em ensaios de microabrasão por esfera rotativa, fornecendo dados experimentais importantes do efeito abrasivo de sedimentos fluviais, com evidências demonstradas ao longo deste trabalho. Já a avaliação do aumento da vida útil dos rotores pela variação da rotação foi realizada matematicamente para um cenário anual de bombeamento, considerando a variação fluviométrica da cota e da carga de sedimento do rio Acre.

A simulação de desgaste em função da intensidade de abrasão, na prática, é complicada por diversos fatores adicionais. Infelizmente ainda não há uma interdependência matemática exata para correlacionar todas as variáveis inerente ao processo de desgaste como a homogeneidade das partículas, as alterações contínuas de pulsações nas velocidades relativas as pás do rotor durante o movimento do fluxo, variação do fluxo em várias correntes individuais que podem variar em função das alterações do perfil das pás ocasionadas pelo desgaste, variação da operação do sistema e as próprias características do projeto hidráulico, que complicam o padrão real de abrasão.

Dessa forma, este autor recomenda uma avaliação futura em ensaios de desgaste de rotores em ambiente controlado, para buscar entender melhor as alterações do perfil das pás, decorrente do desgaste abrasivo e sua influência no rendimento da máquina, com experimentos em escala temporal maiores.

Por fim, mesmo não cobrindo todas as lacunas no estudo de desgaste de rotores pelo efeito abrasivo dos sedimentos, os resultados aqui apresentados, indicam a importância da variação rotacional como procedimento para redução do desgaste, em função da variação da carga de sedimentos e da cota do rio utilizado como fonte pelas EEABs.

## 9 REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984). NBR 6508 – Grãos de solo que passam na peneira 4,8mm – Determinação de massa específica – Métodos de ensaios, dezembro, outubro, 1984

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984). NBR 7181 – Solo – Análise Granulométrica – Métodos de ensaios, dezembro, 1984.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (1986). NBR 6457 – Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização – Métodos de ensaios, agosto, 1986.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (1995). NBR 6502 – Rochas e solos. Brasil, 30/10/1995, 18p. Acesso em 03/2016, disponível em: <https://intranet.ifs.ifsuldeminas.edu.br>

AESBE, Especial: Texto do PLANSAB levanta dúvidas sobre a respectiva viabilidade de implementação – Complexidade de algumas ações previstas irá implicar maior ordenação e estruturação dos entes, atores e sociedade civil. **Revista de Saneamento (SENEAR)**. Ano VI, nº. 23, p. 23-25, 2014.

ALLIANCE - Aliança para Conservação de Energia. *Água e Energia: Aproveitando as Oportunidades de Eficientização de Água e Energia não Exploradas nos Sistemas de Água Municipais*. Em Português. Washington, EUA, 2002. Acesso em 03/2016, disponível em: [http://www.lenhs.ct.ufpb.br/html/downloads/livros/agua\\_energia/aguaeenergia.pdf](http://www.lenhs.ct.ufpb.br/html/downloads/livros/agua_energia/aguaeenergia.pdf)

ALLSOPP, D. N. & HUTCHINGS I. M. *Micro-scale abrasion and scratch response of PVD coatings at elevated temperatures*, **Wear**, v. 251, p. 1308 – 1314, 2001. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.10.008>

ALMEIDA, H. D. F.; COSTA, M. L.; REGO, J. A. R.; COSTA, A. M.; MARTINS, M. M. M.; OLIVEIRA, M. S. Mineralogia e Composição Química dos Sedimentos Praianos dos Rios que

Drenam o Estado do Acre: Implicações Sobre o Intemperismo nas Áreas Importância para Agricultura e o Ambiente. *Anais XLII Congresso Brasileiro de Geologia, SBG*, Araxá, Minas Gerais, 2004.

ARCHARD, J. F. & HIRST, W. **The Wear of Metals Under Unlubricated Conditions**. Proc. Roy. Soc., London, v. 236, p. 397-410, 1956. DOI: <https://doi.org/10.1098/rspa.1956.0144>

ARRETCHE, M. T. S. Política Nacional de Saneamento: a Reestruturação das Companhias Estaduais, **Infraestrutura: Perspectivas de Reorganização - Saneamento**, p. 75-106, IPEA, Brasília, DF, 1999.

ARTUZO, G. C. Determinação do Coeficiente de Atrito nos Ensaios de Abrasão por Esfera Rotativa. **Dissertação de mestrado**, Rede temática em Engenharia de Materiais, UFOP, Ouro Preto, 96p, 2014.

ASKELAND, D. R.; FULAY, P. P.; AND WRIGHT, W. J. **The Science and Engineering of Materials**. CENGAGE Learning, USA, 6 ed., 921 p, Stamford USA, 2010.

ASTM – G40 - “*Standard Terminology Relating to Wear and Erosion*,” G 40, **Annual Book of ASTM Standards**, ASTM, 2015.

AXÉN, N.; JACOBSON, S.; HOGMARK, S. Influence of hardness of the counterbody in three-body abrasive wear – an overlooked hardness effect, *Tribology International*, v. 27, n. 4, p. 233-241, 1994. DOI: <https://doi.org/0301-679X/94/04/0233-09>

BOSE, K. & Wood\*, R. J. K. Optimum tests conditions for attaining uniform rolling abrasion in ball cratering tests on hard coatings. *Wear*, v.258, p.322-332, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.09.018>

BRASIL, A. N. **Maquinas Termo hidráulicas de Fluxo – Teoria Geral das Maquinas de Fluxo**, p 20-61. 2010.

BROSS, S. and ADDIE, G. Prediction of Impeller Nose Wear Behavior in Centrifugal Slurry Pumps. *Experimental Thermal and Fluid Science*, v. 26, p. 841–849, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0894-1777\(02\)00174-7](https://doi.org/10.1016/S0894-1777(02)00174-7)

CALLISTER JR, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**, 5ª. ed. rev., LTC, 578p, Rio de Janeiro, 2002.

CARVALHO, A. T.; COSTA, M. L.; ALMEIDA, H. D. F. Os Sedimentos em Suspensão dos Rios Purus e Juruá no Estado do Acre, *Revista Científica da UUFPA*, Belém – PA, 8 p. 2008. Acesso em 03/2016, disponível em: <http://www.cultura.ufpa.br/rcientifica/cabecalho.php?conteudo=5.1>

CARVALHO, D. F. **Instalações elevatórias – Bombas**. Editora FUMARC – Fundação Mariana Resende Costa, 365p., CDU 621.65, 2010.

COLAÇO, R. Comportamento ao desgaste abrasivo de ligas Fe-Cr-C processadas e desenvolvidas por laser. **Tese (Doutorado)**, Lisboa: Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 2001, 250p.

CONDURÚ, M.T. & PEREIRA, J. A. R. Informação estratégica para a gestão hidroenergética de sistemas de abastecimento de água. Sistemas de Saneamento - **Eficiência Energética**. GOMES, H. P. (Organizador). Editora Universitária – UFPB. João Pessoa. V.1, p. 111-122, 2010.

COSTA, A. M. **Análise Histórica do Saneamento no Brasil**. Dissertação de Mestrado, ENSP-Escola Nacional de Saúde Pública, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1994.

COSTA, W. P. O Saneamento Básico no Brasil, da Década de 40 à Década de 80, **Engenharia Sanitária**, v. 22, n. 1, p. 08-25, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1983.

COZZA, R. C. Estudo do desgaste e atrito em ensaios micro-abrasivos por esfera rotativa fixa em condições de força normal constante e pressão constante. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da USP, São Paulo, 2011. 327p.

COZZA, R. C. Effect of pressure on abrasive wear mode transitions in micro-abrasive wear tests of WC-Co P20. *Tribology International*, v. 57, p. 266-271, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2012.06.028>

COZZA, R. C.; RODRIGUES, L. C.; SCHON, C. G. *Analysis of the micro-abrasive wear behavior of an iron aluminide alloy under ambient and high-temperature conditions*. **Wear**, v. 330-331, p. 250-260, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2015.02.021>

\_\_\_\_\_. DECRETO Nº 7.217/2010. Regulamenta a Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. **Diário Oficial da União**, Brasília, 21 de junho de 2010.

DE LA TORRE, A. Efficiency Optimization in SWRO Plant: High Efficiency & Low Maintenance Pumps. **Desalination**, v. 221 (1-3), p. 151-7, 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2007.02.052>

DIAS, R. A. **Impactos da Substituição de Equipamentos no Processo de Conservação de Energia** Dissertação de mestrado. Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 1999.

DIN. DIN 50320. Wear; Terms, Systematic Analysis of Wear Processes, Classification of Wear Phenomena. English, **International Classification for Standards**, 8p, Alemannic, 1979.

DUAN, C. G. Approach to the Demand on Anti Abrasive Erosion from Hydraulic Machinery Project. *Hydraulic Machinery and cavitation, Proceedings of XIX IAHR Symposium*, World Science, Singapore, p.59-69, 1998

DUAN, C. G & KARELIN, V. Y. *Abrasive Erosion & Corrosion of Hydraulic Machinery. Series on Hydraulic Machinery*. V.2, 408p. Copyright Imperial College Press, 2002

DUARTE, A. F.; GIODA, A. Inorganic Compositional of Suspended Sediments in the Acre River, Amazon Basin, Brazil. **Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis**, v. 21(1), p. 3-15, 2014.

FARFÁN-CABRESA, L. I.; GALLARDO-HERNÁNDEZ, E. A.; PASCUAL-FRANCISCO, J. B.; RESENDIZ-CALDERON, C. D. R.; ROSA, C. S. Experimental method for wear assessment of sealing elastomers. **Polymer Testing**, v.53, p.116-121, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymertesting.2016.04.021>



FERNANDES, F.; RAMALHO, A.; LOUREIRO, A.; CAVALEIRO, A. Mapping the micro-abrasion resistance of a Ni-based coating deposited by PTA on gray cast iron. *Wear*, v.298, n.293, p.151-158, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2012.05.018>

FLYGT. Parts list – 3300. ITT Industries, 76p. 2004. Acesso em 03/2016, disponível em < [www.flygt.com](http://www.flygt.com) >

FOX, R. W. (1934), **Introdução à mecânica de fluidos** / Robert W. Fox, Alan T. McDonald, Philip J. Pritchard: Tradução de Ricardo Nicolau Nassar Koury, Geraldo Augusto Campolina. França. Rio de Janeiro: LTC, 2006

FUNASA. Brasil, Fundação Nacional de Saúde. **Manual de Saneamento** (FUNASA), 3º ed., p. 408, Brasília 2006.

GANT A. J. & GEE, M. G. A review of micro-scale abrasion testing. Topical Review, **Journal of Physics D: Applied Physics**, n.44, 15p. 2011. DOI: <http://doi:10.1088/0022-3727/44/7/073001>

GARTON, A.; STEVENSON, W. T. K.; MCLEAN, P. D.; The Stability of Polymers in Low Earth Orbit; **Materials and Design**; Volume 7; p. 319-323; 1986. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0261-3069\(86\)90102-0](http://dx.doi.org/10.1016/0261-3069(86)90102-0)

GIBSON, I. H. Variable-Speed Drives as Flow Control Elements. **ISA Trans**, v. 33 (2), 165–9, 1994. DOI: [https://doi.org/10.1016/0019-0578\(94\)90049-3](https://doi.org/10.1016/0019-0578(94)90049-3)

GOMES, H. P.; SILVA, J. G. Concepção Econômica de Sistemas de Distribuição de Água, considerando as Condições de Contorno Variáveis no Projeto. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 11 (2), p. 99–110, 2006.

GOMES, H. P. **Sistemas de Saneamento: Eficiência Energética**. 1º ed, 366p., Editora Universitária, João Pessoa, 2010.

HELLER, L. e PÁDUA, V. L. **Abastecimento de Água para o Consumo Humano**. Editora UFMG, V1, 2ºed, 418p. Belo Horizonte – MG, 2010.

HUTCHINGS, I. M. Tribology: **Friction and Wear of Engineering Materials**. Edward Arnold, 1 ed., 273 p., Londres, 1992.

JAYAWARDENA, A. W.; LEE, J. H. W.; AND WANG, Z. Y. *Sediment control at water intake towers in Keum River, South Korea*. **River Sedimentation: Theory and Applications**, p. 481-485, Hong Kong, china, 1999. Acesso em 05/2016, disponível em: <https://apps.webofknowledge.com>

KAYA, D.; YAGMUR, E. A.; YIGIT, K. S.; KILIC, F. C.; EREN, A, S.; CELIK, C. Energy Efficiency in Pumps. **Energy Convers Manag**, v.49 (6), p. 1662–1673, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2007.11.010>

KASSMAN, A., JACOBSON, S., ERICKSON, L., HEDENQVIST, P., OLSSON, M. *A new test method for the intrinsic abrasion resistance of thin coatings*, **Surface and Coatings,Technology**, v. 50, p. 75 – 84, 1991. DOI: [https://doi.org/10.1016/0257-8972\(91\)90196-4](https://doi.org/10.1016/0257-8972(91)90196-4)

KRELLING, A. P.; da COSTA, C. E.; MILAN, J. C. G., ALMEIDA, E. A. S. *Micro-abrasive wear mechanisms of borided AISI 1020 steel*. **Tribology International**, v. 111, p. 234-242, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2017.03.017>

KSB, Bombas Hidráulicas SA (2008). Manual Técnico e Curvas Características – Nº A1150.0P/3: Bombas Centrifugas de Uso Geral. Várzea Paulista – SP, 83p. Acesso em 03/2016, disponível em [www.ksb.com.br](http://www.ksb.com.br).

LARSEN-BASSE, J.; *Wear of Hard Metals in Rock Drilling: A Survey of the Literature; Powder Metallurgy*; Volume 16; p. 1-32; 1973. DOI: <http://dx.doi.org/10.1179/pom.1973.16.31.001>

LEE, WON-HO. *Estimation of Reservoir Sediment Deposition Using Two Dimensional Model*. **Journal of the Korean Geoenvironmental Society**. v 9, ed 5, p 21-27, Kerean, 2008.

\_\_\_\_\_. Lei Nº 11.445/2007. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico. **Diário Oficial da União**, Brasília, 5 de janeiro de 2007.

LI, Y.; ZHU Z.; HE Z.; HE W. Abrasion Characteristic Analyses of Solid-liquid Two-phase Centrifugal Pump. *Journal of Thermal Science*, v. 20(3): p. 283–287, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11630-011-0471-8>

MAIO, F. DI; HU, J.; TSE, P.; PECHT, M.; TSUI, K.; AND ZIO, E. *Ensemble-approaches for Clustering Health Status of Oil Sand Pumps. Expert Systems With Applications*, Elsevier, v. 39, n. 5, p. 4847-4859, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.10.008>

MACINTYRE, A. J. **Bombas e Instalações de Bombeamento**. 2.<sup>a</sup> Edição. 782 p. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. Rio de Janeiro, RJ. 2013.

MARTELLO, A. Mercado sobe previsão para o crescimento do PIB em 2017 e 2018. Economia e mercado G1, publicado em 06/03/2017. Acessado em 20/11/2017 < <https://g1.globo.com/economia/mercados/noticia/mercado-sobe-previsao-para-o-crescimento-do-pib-em-2017-e-2018.ghtml> >

MASCARENHAS, A.F.S.; BRABO, E.S.; SILVA, A.P.; FAYAL, K.F.; JESUS, I.M.; SANTOS, E.C.O. Avaliação da concentração de mercúrio em sedimentos e material particulado no Rio Acre, Estado do Acre, Brasil, *Acta Amazônia*, v. 34(1), p. 61-68, 2004.

MATAIX, C. **Turbomáquinas Hidráulicas**. Universidad Pontificia Comillas. 2.<sup>a</sup> ed. 1718p. Madrid, 2009.

MENDES, C. H. A. Implicações Ambientais no Desenvolvimento da Infra-Estrutura: Saneamento Urbano, *Revista de Administração Pública*, v. 26, n. 4, pp. 32-51, 1992.

MONTALVO, I.; IZQUIERDO, J.; SCHWARZE, S.; PÉREZ-GARCÍA, R. *Multi-objective Particle Swarm Optimization Applied to Water Distribution Systems Design: an Approach With Human Interaction. Math Comput Model*, v. 52 (7-8), p. 19–27, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2010.02.017>

MONTEIRO, J. R. P. R. Saneamento Básico e a Conjuntura, *Engenharia Sanitária*, v. 22, n. 3, p. 272-280, Rio de Janeiro, Brasil, 1983.

NOGUEIRA, L. A. H. Uso racional: a fonte energética oculta. **Estudos Avançados**, v.21, n.59, p. 91-105, 2007.

OLIVEIRA, E. G., RUTKOWSKI, M. O Saneamento Urbano sob a Ótica dos Agentes Sociais: a Questão da Sustentabilidade. In: **XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental - AIDIS**, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil, 2000.

PALOMINO, A. E. C. Desenvolvimento de Metodologia para Determinação Dimensional de uma Bomba Centrífuga Utilizando Velocidades Específica. Dissertação. Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, 132 p. 2017.

PAGLTHIVARTHI, K. V. & VISINTAINER, R. J. *Solid-liquid Flow-induced Erosion Prediction in Three-dimensional Pump Casing*. **International Symposium on Liquid-Solid Flows, ASME 2009 Fluids Engineering Division Summer Meeting (FEDSM2009)**, Colorado, USA, V1: p. 611–617, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1115/FEDSM2009-78274>

PINTAÚDE, G. Análise dos regimes moderado e severo de desgaste abrasivo utilizando ensaios instrumentados de dureza. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da USP, 2002. 200p.

PIMENTEL-GOMES, F. **Curso de estatística experimental**. 15. ed. Piracicaba: Fealq, 2009. 451p

PLANSAB. **Plano Nacional de Saneamento Básico**. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Brasília: SNSA, p.173, maio 2013.

REGO, J.A.R.; COSTA, M.L.; ALMEIDA, H. F. D.; BRABO, E.S. Aspectos Físico-químicos e Considerações Geoquímicas Sobre as Águas Fluviais do Acre, **Anais XLII Congresso Brasileiro de Geologia**, SBG, Araxá, Minas Gerais, 2004.

RESENDE, M. F. de. **Interferência Provocada pela Infestação de Mexilhões – Dourados (Limnoperna fortunei) Sobre Bombas Centrífugas e Seus Impacto em Sistemas de Bombeamento de Água**. Tese de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – UFMG, Belo Horizonte, Minas Gerais, 139 p. 2014.

RIBEIRO, R. Avaliação da resistência ao desgaste abrasivo de revestimentos soldados do tipo Fe-Cr utilizados na indústria sucroalcooleira. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, UNESP, 2004, 118p.

RIBEIRO, S. & BONETTI, C. Variabilidade Morfométrica de Sedimentos Arenosos: Revisão de Métodos e Uso do Software ImageJ na Diferenciação de Ambientes Depositionais na Ilha de Santa Catarina e Região Continental, SC, Brasil. **GRAVEL**, v. 11, p 37-47, Porto Alegre, 2013.

RICHARDSON, R. C. D.; Wear of Metals by Relatively Soft Abrasives; **Wear**; V11; 245-275 p.; 1968. DOI: [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(68\)90175-0](https://doi.org/10.1016/0043-1648(68)90175-0)

RODRIGUEZ, J. M.; EDESKAR, T.; KNUTSSON, S. *Particle Shape Quantities and Measurement Techniques—A Review*. **EJGE**, v 18, p 169 – 198, 2013. Acesso em 05/11/2017. <http://www.ejge.com/2013/Ppr2013.016alr.pdf>

ROHDE, R. A. **Metalógrafia – Preparação das Amostras: Uma abordagem pratica**. LEMM, URI. 30 p, v 3, outubro de 2010.

RUTHERFORD, K. L.; HUTCHINGS I.; RUTHERFORD, K. Theory and application of a micro-scale abrasive wear test. Journal of Testing Evaluation of the American Society for Testing and Materials, v. 25, n. 2, p. 250-260, 1997. DOI: <https://doi.org/10.1520/JTE11487J>

RUTHERFORD, K. L., HUTCHINGS, I. M. *A micro-abrasive wear test with particular application to coated systems*, **Surface and Coatings Technology**, v. 79, pp. 231-239, 1996. DOI: [https://doi.org/10.1016/0257-8972\(95\)02461-1](https://doi.org/10.1016/0257-8972(95)02461-1)

SANTOS, H. R.; PRADO, G. S.; VIDAL, C. M. de S.; MORUZZI, R. B.; CAMPOS, J. R. Aplicabilidade das Técnicas de Determinação de Tamanho de Partículas em Sistema de Tratamento de Água e Esgoto Sanitário. Nota Técnica. **Eng. Sanit. Ambient.** v 9, n 4, p 291-300, 2004.

SANTOS, Z. A. S. **Seleção de Materiais e Análise de Valor: Metodologia Balanced Scorecard de Engenharia da Qualidade Aplicada ao Estudo do Desgaste e Coroa de Perfuração de uma Empresa de Sondagem**. Tese de Doutorado, UFOP, Ouro Preto – MG, 115 p., 2012. Acesso em 31/08/2016, disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/3026>.

SANTOS, W. C.; PEREIRA NETO, J. O.; SILVA, R. O. da; RODRIGUES, G.; MORETO, J. A.; MANFRINATO, M. D.; ROSSINO, L. S. Desenvolvimento de Dispositivo e Estudo do Comportamento ao Micro desgaste Abrasivo do Aço AISI 420 Temperado e Revenido. **Revista Matéria**. V 22, n 02, p 304-315, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620150002.0031>

SASADA, T.; OIKE, M. e EMORI, N.; *The Effects of Abrasive Grain Size on the Transition Between Abrasive and Adhesive Wear*; **Wear**; v. 97; p. 291-302; 1984. DOI: [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(84\)90155-8](https://doi.org/10.1016/0043-1648(84)90155-8)

SEPURB. Diagnóstico do Setor de Saneamento: Estudo Econômico e Financeiro. **Série Modernização do Setor de Saneamento**. Brasília, DF, Brasil, 1995.

SERRANO, R. O. P.; FERREIRA JUNIOR, A. G.; CASTRO, A. L. P. de; SANTOS, P. A. B. V. dos; MENEZES, M. V.; MARTINEZ, C. B. Desgaste do Rotor por Abrasão: O efeito do bombeamento de água bruta com diferentes cargas de sedimento. **XXVII Congresso Latinoamericano de Hidráulica**, Lima, Perú, 9p. 2016.

SILVA, F. A. S. & AZEVEDO, C. A. V. *The Assistat Software Version 7.7 and its use in the analysis of experimental data*. **Afr. J. Agric. Res.** v. 11, n. 39, pp. 3733-3740, 29 September, 2016. DOI: <https://doi.org/10.5897/AJAR2016.11522>

STACHOWIAK\* G. B.; & STACHOWIAK, G. W. *The effects of particle characteristics on three-body abrasive wear*. **Wear Elsevier**, n 249, p 201-207, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(01\)00557-9](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(01)00557-9)

STACHOWIAK, G. W. & BATCHELOR, A. W.; **Engineering Tribology**, Department of Mechanical and Materials Engineering, University of Western Australia, 769p., Australia, 2007.

SWANSON, P. A. & VETTER, A. F.; *The Measurement of Abrasive Particle Shape and Its Effect on Wear*. ASLE Transactions. v 28, p. 225-230; 1985. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/05698198508981615>

TIAN, H. H.; ADDIE, G. R.; AND PAGALTHIVARTHI, K. V. *Determination of Wear Coefficients for Erosive Wear Prediction Through Coriolis Wear Testing*. **Wear, Elsevier**, v. 259, n. 1-6, p.160-170, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.02.097>

TREZONA, R. I.; ALLSOPP, D. N. HUTCHINGS, I. M. Transitions between two-body and three-body abrasive wear: influence of test conditions in the microscale abrasive wear test. *Wear*, v. 225-229, p. 205-214, 1999. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(98\)00358-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(98)00358-5)

TSUTIYA, M. T. Uso de Inversores de Frequência para Diminuição do Consumo de Energia em Bombeamento. GOMES, H. P.; GARCIA, R. P.; REY, P. L. I. (org.). *Abastecimento de Água: O Estado da Arte e Técnicas Avançadas*. **Editora Universitária – UFPB**, p. 103-122, João Pessoa, 2007.

UPADHYAY, R. K. & KUMARASWAMIDHAS, L. A. *A review on tribology of surfaces and interfaces*. **Advanced Materials Letters**, 5(9), p. 486-495, 2014. DOI: <https://doi.org/10.5185/amlett.2014.5566>

VILANOVA, M. R. N. and BALESTIERI, J. A. P. *Energy and Hydraulic Efficiency in Conventional Water Supply Systems*. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 30, p.701–714, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.11.024>

WANG, G.; YUE, Z. and WEI, C. *Sand sedimentation tank for use in municipal and industrial water project, has tank body whose end is provided with water inlet area, water distribution system formed with through hole, and water collecting end provided with tank body*. **Patent Number (s): CN203355388-U**, China, 2013. Acesso em 03/2016, disponível em: <https://gateway.webofknowledge.com/charon/chgateway.cgi?action=daj&pan=2014D59365&format=pdf>

WARMAN. **Slurry Pump Handbook**. Weir Slurry Group, Inc., Fifth Edition Electronic Version, 56 p., 2009. Acesso em 03/2016, disponível em: <http://www.weirminerals.com/pdf/Slurry%20Pumping%20Handbook%20-%202009.pdf>.

WENTWORTH, C. K. *A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments*. *Journal of Geology*, v. 30: p. 377–392, 1922. Acesso em 03/2016, disponível em: [http://www.science.earthjay.com/instruction/HSU/2015\\_fall/GEOL\\_332/labs/lab\\_07/Wentworth\\_1922\\_Clastic\\_sediments.pdf](http://www.science.earthjay.com/instruction/HSU/2015_fall/GEOL_332/labs/lab_07/Wentworth_1922_Clastic_sediments.pdf)

XING, D.; HAI-LU, Z.; XIN-YONG, W. Finite Element Analysis of Wear for Centrifugal Slurry Pump. In: Proceedings of the International Conference on Mining Science and Technology, ICMST, Procedia Earth and Planetary Science, v. 1, p. 1532–1538, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2009.09.236>

YUST, C. S. & CROUSE, R. S.; *Melting at Particle Impact Sites During Erosion of Ceramics*; **Wear**; Volume 51; p 193-196; 1978. DOI: [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(78\)90066-2](https://doi.org/10.1016/0043-1648(78)90066-2)

ZHU, C. *Sealing-free, self-controlled and self-sucking pump for sedimentation tank, has upper and lower water storage chambers whose surfaces are provided with supersonic flame spraying nanometer coatings*. **Número da patente:** CN201874833-U, 6p., China, 2010. Acesso em 05/2016, disponível em: <https://apps.webofknowledge.com/OutboundService.do?action=go&displayCitedRefs=true&displayTimesCited=true&displayUsageInfo=true&viewType=ful>



## 10 ANEXO A

Análise granulometria do carboneto de silício (SiC) utilizado nos ensaios de abrasão por esfera rotativa.



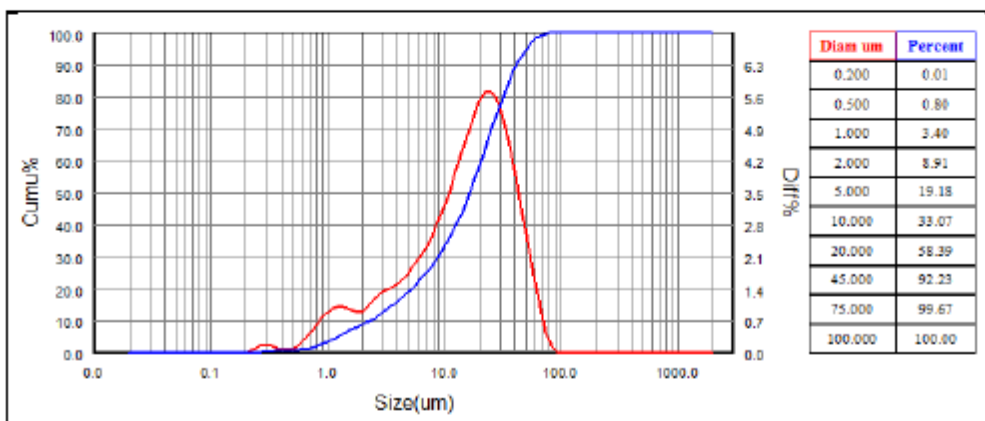
### Betttersize2000 laser particle size analyzer Report of percentage

Range : 0.02um - 2000um

Sample Name: Carboneto de Silício 21-08-17-Average		Sample Owner: Betttersize	
Medium Name: Água Destilada Dispersant:		Measure Dept: Betttersize	
Particle RI:	Optical: Fraunhofer	Operator: Júnio	
Medium RI:	Analysis Mode: 2.31 - General	Test Date: 2017-08-21	Test Time: 09:10:51
Remark:			

D50: 16.47um	D[4,3]: 19.60um	D[3,2]: 5.510um	Obscuration: 22.81%
Span: 2.39	D[2,1]: 1.043um	SSA: 0.000cm <sup>2</sup> /g	Residual: 0.552%

Percent	Diam um	Percent	Diam um	Percent	Diam um	Percent	Diam um	Percent	Diam um
1	0,589	21	5,619	41	12,97	61	21,13	81	32,61
2	0,799	22	5,971	42	13,35	62	21,6	82	33,35
3	0,945	23	6,324	43	13,74	63	22,07	83	34,16
4	1,081	24	6,682	44	14,13	64	22,54	84	35,11
5	1,221	25	7,04	45	14,51	65	23,01	85	36,06
6	1,373	26	7,403	46	14,9	66	23,48	86	37,02
7	1,551	27	7,768	47	15,29	67	23,99	87	37,97
8	1,768	28	8,133	48	15,69	68	24,52	88	39,15
9	2,022	29	8,5	49	16,08	69	25,04	89	40,4
10	2,286	30	8,868	50	16,47	70	25,57	90	41,66
11	2,546	31	9,235	51	16,88	71	26,1	91	42,91
12	2,804	32	9,603	52	17,29	72	26,63	92	44,59
13	3,068	33	9,971	53	17,7	73	27,24	93	46,32
14	3,35	34	10,34	54	18,12	74	27,85	94	48,06
15	3,645	35	10,71	55	18,53	75	28,46	95	50,37
16	3,952	36	11,08	56	18,96	76	29,08	96	52,92
17	4,274	37	11,46	57	19,39	77	29,69	97	55,9
18	4,603	38	11,83	58	19,82	78	30,36	98	60,01
19	4,938	39	12,21	59	20,26	79	31,11	99	66,35
20	5,278	40	12,59	60	20,69	80	31,86	100	88,48



Company : Betttersize Instruments Ltd. Http : [www.betttersize.com](http://www.betttersize.com) E-mail : [info@betttersize.com](mailto:info@betttersize.com) Tel : 0086-415-6163800

## 11 ANEXO B

Análise granulometria dos sedimentos bombeados pela estação elevatória de água bruta da ETA II, utilizados nos ensaios de abrasão por esfera rotativa.

### ANÁLISE GRANULOMÉTRICA CONJUNTA (NBR 7181/84)

AMOSTRA TOTAL			TEOR DE UMIDADE								
M <sub>t</sub>	(g)	1500,00	Determinação N°	1	2	3	4	5			
M <sub>g</sub>	(g)	16,12	Cápsula N°	58	5	121					
M <sub>ts</sub>	(g)	1482,49	M <sub>c+s+w</sub>	77,48	67,35	78,95					
AMOSTRA PARCIAL			M <sub>c+s</sub>	76,82	66,77	78,19					
M <sub>sed</sub>	(g)	120,00	M <sub>c</sub>	22,20	15,28	16,84					
M <sub>s, sed</sub>	(g)	118,58	M <sub>s</sub>	54,62	51,49	61,35					
			M <sub>w</sub>	0,66	0,58	0,76					
			w	1,2%	1,1%	1,2%					
			Utilizar valor?(s/n)	s	s	s					
			w (compor a média)	1,2%	1,1%	1,2%					
			W <sub>médio</sub>	1,2%							
PENEIRAMENTO GROSSO			PENEIRAMENTO FINO				DADOS SEDIMENTAÇÃO				
# abertura	M <sub>si,ret</sub>	M <sub>si,ret,acum</sub>	Pg	# abertura	M <sub>si,ret</sub>	M <sub>si,ret,acum</sub>	Pf	Densímetro N°			
(mm)	(g)	(g)	(%)	(mm)	(g)	(g)	(%)				
50,0	0,00	0,00	100,00%	1,200	0,00	0,00	98,91%	1			
38,0	0,00	0,00	100,00%	0,600	0,03	0,03	98,89%	Volume (cm <sup>3</sup> )			
25,0	0,00	0,00	100,00%	0,420	0,00	0,03	98,89%	41,9			
19,0	0,00	0,00	100,00%	0,250	0,30	0,33	98,64%	Proveta n°			
12,7	0,00	0,00	100,00%	0,150	13,30	13,63	87,54%	10			
9,5	8,42	8,42	99,43%	0,075	56,58	70,21	40,35%	Área (cm <sup>2</sup> )			
4,8	4,95	13,37	99,10%	Prato	6,13	76,34	35,24%	29,11			
2,0	2,75	16,12	98,91%					VI/(2xA)			
								ρ <sub>s</sub>			
								2,639			
SEDIMENTAÇÃO											
Data	Hora	Δt (s)	L <sub>i</sub>	T (°C)	L <sub>d</sub>	L <sub>c</sub>	ρ <sub>w</sub> = ρ <sub>disp</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	μ <sub>w</sub> 10 <sup>-6</sup> x(g.s/cm <sup>2</sup> )	z (cm)	d (mm)	P <sub>sed</sub> (%)
30/8	08:09	0									
30/8	8:09	30	25,0	22,7	3,79	22,41	0,9977	9,66	13,100	0,06806	30,02%
30/8	8:10	60	20,0	22,7	3,79	17,41	0,9977	9,66	14,100	0,04993	23,32%
30/8	8:11	120	16,8	22,7	3,79	14,21	0,9977	9,66	14,740	0,03610	19,04%
30/8	8:13	240	13,9	22,7	3,79	11,31	0,9977	9,66	15,320	0,02602	15,15%
30/8	8:17	480	12,2	22,7	3,79	9,61	0,9977	9,66	15,660	0,01860	12,87%
30/8	8:24	900	12,0	22,9	3,76	9,44	0,9976	9,61	15,700	0,01357	12,65%
30/8	8:39	1800	11,9	23,0	3,74	9,36	0,9976	9,56	15,720	0,00958	12,54%
30/8	9:09	3600	11,3	23,1	3,73	8,77	0,9975	9,54	15,840	0,00679	11,75%
30/8	10:09	7200	11,0	23,4	3,68	8,52	0,9975	9,49	15,900	0,00480	11,42%
30/8	12:09	14400	10,2	23,0	3,74	7,66	0,9976	9,56	16,060	0,00342	10,26%
30/8	16:09	28800	9,8	25,0	3,40	7,60	0,9971	9,13	16,140	0,00237	10,18%
31/8	8:09	86400	9,1	22,9	3,76	6,54	0,9976	9,61	16,280	0,00141	8,76%