



UFOP

Universidade Federal
de Ouro Preto



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

Universidade Federal de Ouro Preto

Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil

Curso de Graduação em Engenharia Civil



IGOR ANDRADE AZEVEDO

**ANÁLISE DO DESGASTE POR ABRASÃO DE ROTORES EM AÇO
INOXIDÁVEL AISI 304 DE BOMBAS DE ESTAÇÃO ELEVATÓRIA DE
ÁGUA BRUTA DE ETA'S, VARIANDO A CARGA DE SEDIMENTOS**

Ouro Preto, MG

2019

Análise do desgaste por abrasão de rotores em aço inoxidável AISI 304 de bombas de estação elevatória de água bruta de ETA's, variando a carga de sedimentos

Igor Andrade Azevedo

Monografia de conclusão de curso para obtenção do grau de Engenheiro Civil na Universidade Federal de Ouro Preto defendida e aprovada em 12 de julho de 2019 como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro Civil.

Área de concentração: Materiais e Componentes de Máquinas Hidráulicas

Orientadora: Prof.^a D.Sc. Ana Letícia Pilz de Castro - UFOP

Co-orientador: Prof. D.Sc. Rodrigo Otávio Peréa Serrano – UFAC

Ouro Preto, MG

2019

A994a

Azevedo, Igor Andrade.

Análise do desgaste por abrasão de rotores em aço inoxidável aisi 304 de bombas de estação elevatória de água bruta de eta?s, variando a carga de sedimentos [manuscrito] / Igor Andrade Azevedo. - 2019.

63f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientadora: Profª. Drª. Ana Letícia Pilz Castro.

Coorientador: Prof. Dr. Rodrigo Otávio Peréa Serrano.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia Civil.

1. Aço inoxidável - Desgaste abrasivo. 2. Aço inoxidável AISI 304. 3. Rotores. I. Castro, Ana Letícia Pilz. II. Serrano, Rodrigo Otávio Peréa. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

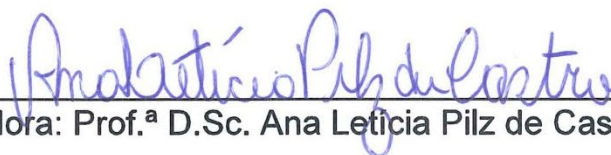
CDU: 624

Catálogo: ficha.sisbin@ufop.edu.br

Análise do desgaste por abrasão de rotores em aço inoxidável AISI 304 de bombas de estação elevatória de água bruta de ETA's, variando a carga de sedimentos

Igor Andrade Azevedo

Monografia de conclusão de curso para obtenção do grau de Engenheiro Civil na Universidade Federal de Ouro Preto defendida e aprovada em 12 de Julho de 2019 como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro Civil.
Banca examinadora:



Orientadora: Prof.^a D.Sc. Ana Letícia Pilz de Castro - UFOP



Co-orientador: Prof. D.Sc. Rodrigo Otávio Peréa Serrano – UFAC



Membro: Prof. D.Sc. Maria Aparecida Pinto – UFOP



Membro: Prof. M.Sc. Maria Luíza Teófilo Gandini – UFOP

*Dedico este trabalho à minha família e amigos,
que sempre estiveram presentes em cada momento.*

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Ouro Preto, pela oportunidade do curso e por poder crescer com ele, por oferecer estrutura e qualidade de ensino, propiciando tantas experiências e amizades.

Agradeço também a todos os meus professores da graduação, em especial os responsáveis por esse trabalho, professora Ana Leticia e ao professor Rodrigo, pelas oportunidades e paciência nas orientações.

À professora Maria Aparecida, professor Gilberto e ao Graciliano, pelos quais estendo agradecimento ao Laboratório de Microabrasão, ao NanoLab e ao LTM, pelo suporte e tempo compartilhados.

Agradeço aos meus irmãos de república, companheiros de todas as horas, por toda ajuda e amparo durante esses anos.

Aos amigos, agradeço a participação em todas as etapas, acontecimentos e conquistas até aqui.

RESUMO

O desgaste abrasivo é determinado em função das características do sistema estudado, em estações de bombeamento as características mais importantes são a carga de sedimentos e o regime de trabalho do rotor. Esse desgaste é determinante em relação a eficiência, rendimento e regime de manutenções. A resistência dos materiais dos rotores ao desgaste por abrasão e erosão varia de acordo com suas características e propriedades, como a dureza de sua superfície que determinará a resistência à penetração e outros efeitos dos impactos e interações recebidos de partículas sólidas. Neste trabalho o foco está no desgaste das pás de rotores de bombas centrífugas utilizadas em Estação Elevatórias de Água Bruta (EEAB) de um rio sedimentar da Amazônia brasileira, decorrente da variação da carga de sedimentos e da cota fluviométrica do rio. Analisou-se a capacidade abrasiva dos sedimentos do leito do Rio Acre no desgaste do aço AISI 304, utilizado na fabricação de rotores de bombas centrífugas. 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 inoxidável AISI 304, usando como suspensões abrasiva as concentrações de 1g/l, 2g/l, 3g/l, 5g/l e 10g/l de sedimento em água destilada. Análises com modelagem numérica foram utilizadas para estimar os valores de velocidade relativa do fluido nas pás do rotor, levando a valores de forças de arrasto em diferentes seções das pás. Os resultados mostram: a capacidade abrasiva dos sedimentos em diferentes concentrações; o efeito da concentração da suspensão abrasiva no valor do coeficiente de desgaste (K); a maior abrasividade do sedimento do Rio Acre em relação ao carbetto de silício, que chegou a cerca de 280% mais abrasivo; o aço AISI 304 tem resistência até 28 vezes maior ao desgaste abrasivo que o FoFo Nodular; a possibilidade do controle rotacional da bomba em função da cota do rio e da concentração de sedimento pode causar a redução do desgaste abrasivo em até 35%.

Palavras-chaves: Abrasão, Aço inoxidável AISI 304, Rotor, Desgaste Abrasivo.

ABSTRACT

The abrasive wear is determined according to the characteristics of the system studied, in pumping stations the most important characteristics are the sediment load and the working regime of the rotor. This wear and tear is decisive in terms of efficiency, performance and maintenance regime. The resistance of the rotor materials to abrasion and erosion wear varies according to their characteristics and values as the hardness of their surface will determine the penetration resistance and other effects of the impacts received from solid particles. This work analyzes the wear of centrifugal pump rotor blades, used at the Gross Water Effluent Station (EEAB) of sedimentary rivers of the Brazilian Amazon, due to the variation of the sediment load and the river's fluvimetric elevation. In this study, the abrasive capacity of the sediments of the Acre river bed, Brazil, was analyzed in the wear of AISI 304 steel used in the manufacture of centrifugal pump rotors, when used in the collection of raw water. To determine the wear mode and the relationship of the specific wear coefficient of the material (K), as a function of the sediment concentration, a rotating ball abrasometer tests were performed on AISI 304 stainless steel samples, using as abrasive suspensions the concentrations of 1g/l, 2g/l, 3g/l, 5g/l and 10g/l of sediment in distilled water. Numerical modeling analyzes were used to estimate the relative velocity values of the fluid in the rotor blades, leading to drag values in different sections of the blades. The results show: the abrasive capacity of sediments at different concentrations; the effect of the concentration of the abrasive solution on the coefficient of wear (K); the greater abrasiveness of the Acre River sediment in relation to the silicon carbide, which reached about 280% more abrasive; the AISI 304 steel has resistance up to 28 times to the abrasive wearer than the Nodular FoFo; the possibility of rotational control of the pump in function of the river level and sediment concentration can cause abrasive wear reduction of up to 35%.

Keywords: Abrasion, Stainless Steel AISI 304, Rotor, Abrasive Wear.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – (a) Desgaste abrasivo por riscamento, (b) Desgaste abrasivo por rolamento	16
Figura 2 – Interações físicas entre as partículas abrasivas e a superfície do material	17
Figura 3 - Relação entre taxa de desgaste e H_A/H_S	19
Figura 4 – Princípio do ensaio de desgaste por microabrasão de esfera rotativa	20
Figura 5 – Representação esquemática da montagem do braço metálico que origina a força normal (F_N).	21
Figura 6 – Aços inoxidáveis da série 300 – Austeníticos	31
Figura 7 – Precipitação total anual média da bacia do Rio Acre	32
Figura 8 – Série histórica de níveis do Rio Acre na região de Rio Branco	33
Figura 9 – Curva granulométrica dos sedimentos do Rio Acre	35
Figura 10 - Representação esquemática do método de lixamento com trabalho em sentidos alternados	36
Figura 11 – Amostra após lixamento com lixas #80, #100 e #120	37
Figura 12 – Politriz de bancada	38
Figura 13 – Amostra polida, com detalhe no acabamento espelhado	38
Figura 14 – Balança de precisão com 1g e 10g com exatidão de quatro casas decimais	39
Figura 15 – Carbetto de silício antes da pesagem	40
Figura 16 – Abrasômetro de esfera rotativa	41
Figura 17 – Execução do ensaio de abrasão em mecanismo de esfera rotativa	42
Figura 18 – Pá do rotor em estudo delimitada em 5 seções	45

Figura 19 - Variação de F_D em função do raio médio de cada seção e variação da rotação	46
Figura 20 - Ampliações utilizadas nas análises no MEV.....	47
Figura 21 – Sobreposição dos diâmetros médios das calotas de desgaste para cada concentração de sedimento.....	48
Figura 22 – Calotas de desgaste de acordo com a concentração de abrasivo...	49
Figura 23 – Taxa de desgaste em função da concentração de abrasivo.....	50
Figura 24 – Coeficiente de desgaste específico (K) em função da concentração de sedimento.....	51
Figura 25 – Calotas de desgaste para os abrasivos sedimento e carbetto de silício	52
Figura 26 - Taxa de desgaste em função do abrasivo	53
Figura 27 – Desgaste abrasivo por riscamento.....	54
Figura 28 – Detalhe da formação de arrancamento (A), de microsulcamento (B) e microfadigas (C).....	55
Figura 29 - Desgaste das pás do rotor em função da variação da carga de sedimentos do Rio Acre	56
Figura 30 - Desgaste acumulado das pás do rotor em função da concentração de sedimentos do Rio Acre	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do aço AISI 304	30
Tabela 2 – Características construtivas do rotor calculadas a partir do algoritmo de Palomino	43
Tabela 3 - Variação da velocidade do líquido em função da variação de rotação da bomba	45
Tabela 4 – Forças de arrasto por seção	46
Tabela 5 – Diâmetro médio das calotas.....	47

LISTA DE SIGLAS

ABNT-NBR	-	Associação brasileira de Normas Técnicas, Norma Brasileira
AISI	-	American Iron and Steel Institute
B.H.	-	Dureza <i>Brinell</i>
EEAB	-	Estação Elevatória de Água Bruta
ETA	-	Estação de Tratamento de Água
FOFO	-	Ferro Fundido
MEV	-	Microscópio Eletrônico de Varredura

SUMÁRIO

1	Introdução	14
1.1	Objetivo	14
1.1.1	Objetivos Específicos	15
2	Revisão Bibliográfica	16
2.1	Desgaste Abrasivo	16
2.2	Mecanismos de Hidro-Abrasão	18
2.2.1	Sedimentos	18
2.3	Ensaio de Desgaste por Microabrasão em Abrasômetro de Esfera Rotativa	20
2.4	Estações Elevatórias de ETA's	22
2.4.1	Configurações Básicas	23
2.4.2	Modelos de Bombas Utilizadas	25
2.4.3	Eficiência Energética de ETA's	26
2.5	Aço Inoxidável	28
2.5.1	Aço AISI 304	29
3	Metodologia	32
3.1	Caracterização da Área de Estudo	32
3.1.1	Variação da Concentração de Sólidos Suspensos do Rio Acre	32
3.1.2	Variação de Cota do Rio Acre e da Rotação da Bomba	33
3.1.3	Sedimento e Caracterização das Partículas Abrasivas	34
3.2	Preparo das Amostras de Aço AISI 304	35

3.3	Preparação da Suspensão Abrasiva	39
3.4	Ensaio de Abrasão em Abrasômetro de Esfera Rotativa.....	40
3.5	Análise das Calotas de Desgaste com Microscópio Eletrônico de Varredura	42
3.6	Características do Rotor Analisado	42
3.7	Estimativas do Desgaste do Rotor.....	44
3.7.1	Distância Relativa de Deslizamento.....	44
3.7.2	Campos de Velocidade do Rotor em Estudo	44
3.7.3	Forças Atuantes nas Pás do Rotor em Estudo	45
4	Resultados e Discussões	47
4.1	Ensaio de Abrasão e Análise das Calotas	47
4.1.1	Determinação do Desgaste em Função da Concentração de Sedimentos	49
4.1.2	Comparação da Abrasividade do Sedimento e do Abrasivo de Referência	51
4.2	Caracterização do Mecanismo de Desgaste Abrasivo	53
4.3	Estimativa do Desgaste do Rotor	55
5	Conclusão	58
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	59
	Referências.....	60

1 INTRODUÇÃO

A eficiência energética é sempre procurada em todos os processos. No abastecimento de água urbano a eficiência pode ser alvo em vários dos seus sistemas e componentes. Esse trabalho foca em um dos componentes mais solicitados, o rotor das bombas de adução de água bruta. O desgaste dos rotores é o responsável pela perda de rendimento das bombas, sempre requer manutenção ou trocas em curtos intervalos de tempo que, além de transtornos na operação, trazem prejuízos às concessionárias. Na estação de tratamento de água II de Rio Branco no Acre não é diferente, sua captação é realizada no Rio Acre, rio de águas brancas que tem uma grande variação mensal da carga de sedimentos.

As bombas são responsáveis pela maior parte do consumo de energia elétrica de uma estação elevatória de água bruta (EEAB), melhorar o seu desempenho é fator determinante no custo da operação. Por isso, é tão importante estudar o comportamento dos rotores levando em consideração a variação da concentração de sedimentos, determinando os melhores regimes de trabalho e o melhor material utilizado em sua fabricação.

Com base na metodologia criada por Serrano (2017), este trabalho propõe o estudo de uma liga amplamente usada na fabricação de rotores e carcaças de bombas, o aço inoxidável AISI 304, acreditando ser uma liga que apresenta uma resistência elevada ao desgaste abrasivo, podendo ser utilizada para reduzir as perdas de rendimento e desgastes, promovendo maior vida útil aos rotores das bombas de adução de água bruta em rios de águas brancas e de grandes cargas de sedimentos.

1.1 Objetivo

Caracterizar o desgaste abrasivo no aço AISI 304, provocado pelos sedimentos do Rio Acre, possibilitando analisar avaliar a vida útil de rotores fabricados nesse material, levando em consideração a variação da concentração de sedimentos e a

cota do rio Acre. Além disso, poder comparar com a vida útil dos rotores fabricados em FoFo Nodular (Ferro Fundido Nodular) atualmente utilizados na EEAB estudada.

1.1.1 Objetivos Específicos

- Determinar experimentalmente o coeficiente de desgaste em função da concentração de sedimentos para o aço AISI 304.
- Comparar a abrasividade do sedimento com o desgaste proporcionado por um abrasivo padrão (carbeto de silício), nas mesmas condições de ensaio.
- Estimar a evolução do desgaste abrasivo de um rotor de aço AISI 304 de bomba centrífuga em função da variação da rotação da bomba, variação da concentração de sedimento e variação do regime fluviométrico anual do Rio Acre.
- Comparar a evolução do desgaste em rotores de aço AISI 304 com a evolução do desgaste em rotores de FoFo Nodular.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Desgaste Abrasivo

O desgaste abrasivo ocorre quando um material perde massa por contato forçado da sua superfície com outra superfície, havendo movimento relativo entre as duas. Segundo Rowe (1966) este processo ocorre por haver (i) asperidades duras em uma das superfícies ou (ii) partículas abrasivas entre as duas superfícies ou (iii) partículas abrasivas engastadas em uma das superfícies.

O comportamento do desgaste por abrasão ocorre em um sistema como um todo, tendo vários parâmetros independentes que influenciam o desgaste do material. A partir da configuração do sistema, podem ocorrer dois modos de desgaste, o desgaste abrasivo a dois corpos (desgaste abrasivo por riscamento) e o desgaste abrasivo a três corpos (desgaste abrasivo por rolamento) (COZZA, 2006).

Considerando duas superfícies em movimento relativo, no desgaste abrasivo por riscamento as partículas abrasivas estão incrustadas em uma das superfícies, sendo assim elas só podem deslizar sobre o contra corpo e no desgaste abrasivo por rolamento as partículas estão livres entre as duas superfícies, podendo rolar entre as mesmas (HUTCHINGS, 1992). Na Figura 1 é esquematizado como ocorre os dois modos de desgaste.

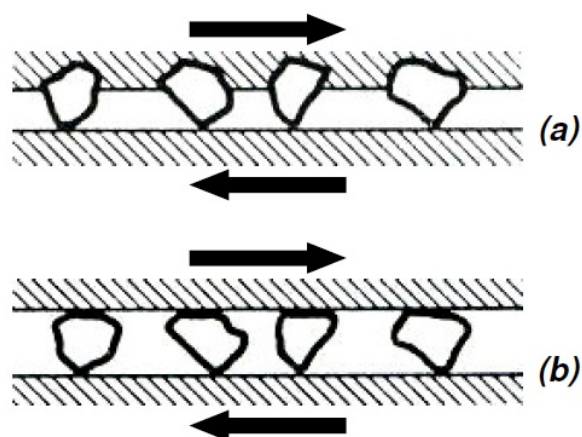


Figura 1 – (a) Desgaste abrasivo por riscamento, (b) Desgaste abrasivo por rolamento (HUTCHINGS, 1992)

Os parâmetros tribológicos do sistema influenciam ainda os submecanismos de desgaste por abrasão, diferenciados pela interação entre a partícula abrasiva e a superfície do material. Segundo Zum Gahr (1987), são quatro os submecanismos de desgaste abrasivo (Figura 2):

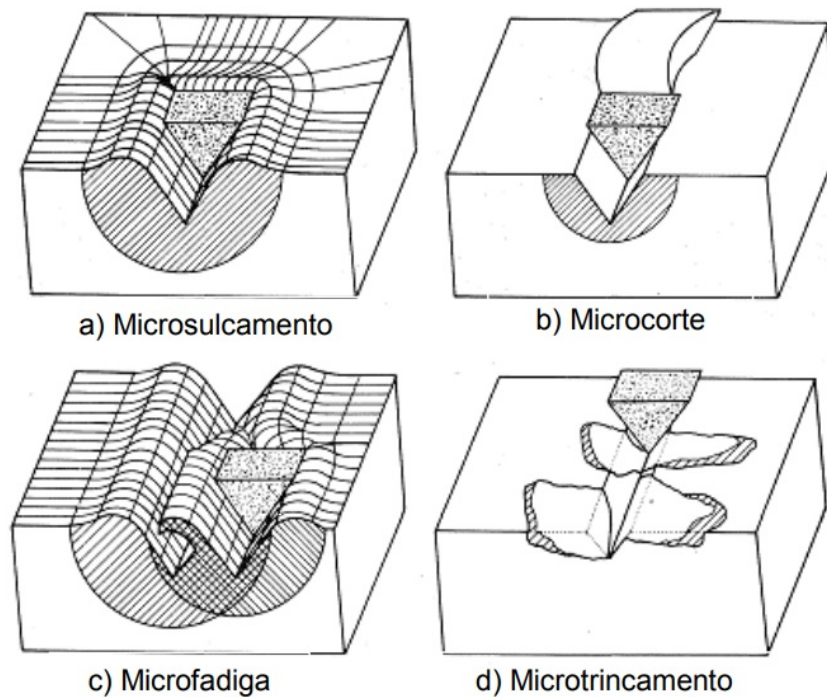


Figura 2 – Interações físicas entre as partículas abrasivas e a superfície do material (ZUM GAHR, 1987)

O microsulcamento é caracterizado pelo acúmulo lateral causado por forte deformação plástica do material e de início nenhuma massa de material é removida. Mediante sucessivas deformações plásticas geradas pelo microsulcamento surgem trincas e/ou delaminações, que resultam na deformação de microfragmentos de desgaste (MÁSCIA, 2002), denominado submecanismo de microfadiga.

Quando as condições de desgaste não permitem elevados níveis de deformação plástica do material, ocorre o submecanismo de microcorte, com conseqüente produção de detritos (FERREIRA, 2010).

O microtrincamento é característico de materiais frágeis, quando as partículas abrasivas impõem altas tensões no contato, favorecendo a formação de trincas que evoluem para desprendimento de material com volumes grandes em relação aos sulcos formados.

2.2 Mecanismos de Hidro-Abrasão

O funcionamento das máquinas hidráulicas, nos corpos de água da bacia Amazônica, apresenta sempre grande dificuldade devido à maior concentração de partículas em suspensão na água em algumas épocas do ano, pois são elas as responsáveis pela hidro-abrasão. A água que escoar por essas máquinas, geralmente com um grande ganho de velocidade, transfere essa energia às partículas que se chocam contra as superfícies das peças, gerando deformações, riscos e rugosidades, fenômeno mecânico de abrasão. (MASSARO, 2017)

Nos rotores de bombas de adução de água bruta esse fenômeno é predominante, um grande inimigo da boa funcionalidade e vida útil destes. Como os rotores giram em grandes velocidades e a água tem de certa forma um regime mais uniforme e direcionado nas carcaças, os danos nos rotores são localizados e com direções bem definidas.

2.2.1 Sedimentos

O termo “ partículas em suspensão” é uma forma de generalizar os diversos tipos de sólidos transportados pela água. O transporte por suspensão acontece quando as partículas sólidas (geralmente menores) permanecem suspensas por conta do regime turbulento. O transporte de fundo acontece quando há deslocamento das partículas (geralmente maiores) durante o escoamento por arrastamento, rolamento ou salto (RIGHETTO, 1998). Em estações elevatórias, pode ocorrer o processo de dragagem, na qual sedimentos mais grosseiros adentram nos ramais de sucção e causam ainda mais danos aos rotores, pois de acordo com Yang (2013), a taxa de desgaste tende a aumentar com o aumento do diâmetro do sedimento. Outro fator determinante na localização do desgaste em rotores é que o sedimento na entrada do rotor tem ângulo

de entrada aleatório e baixa pressão, enquanto na saída do rotor o sedimento tem ângulo de saída inclinado de acordo com a extremidade do rotor (YANG, 2013).

As partículas abrasivas de maior dureza têm maior resistência ao choque e ao rolamento, ocasionando o desgaste de suas faces e o polimento de sua superfície, reduzindo sua capacidade abrasiva. Os abrasivos de dureza e rigidez moderada ao quebrarem, criam outras partículas menores com novas faces afiadas e pontas angulosas, que aumenta a intensidade de abrasão, se comparado com o fragmento original. Já as partículas mais frágeis fragmentam-se rapidamente em partículas menores, reduzindo a abrasividade rapidamente (SWANSON & VETTER, 1985).

Uma forma usada para definir o regime de desgaste é por meio da relação da dureza do abrasivo (H_A) e a dureza do material (H_S). O gráfico da Figura 3 mostra a influência na taxa de desgaste em função dessa relação:

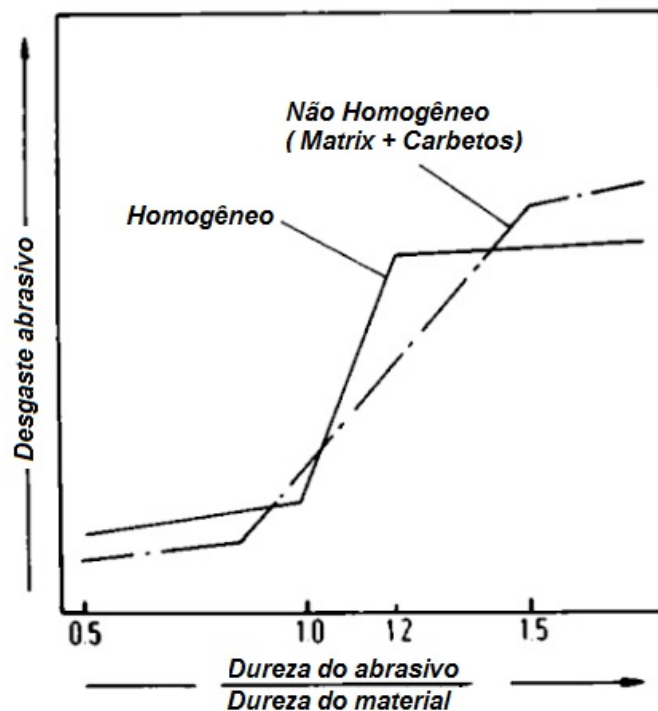


Figura 3 - Relação entre taxa de desgaste e H_A/H_S (ZUM GAHR, 1987)

É possível observar que em materiais homogêneos, para valores de $H_A/H_S < 1$ o regime de desgaste é classificado como moderado e para valores de $H_A/H_S > 1,2$ o

regime é considerado severo, sendo a faixa de $1,0 < H_A/H_S < 1,2$ considerada a região de transição entre estes dois regimes. Quando analisado materiais heterogêneos a região de transição se situa entre $0,8 < H_A/H_S < 1,5$ (CASTRO, 2018).

2.3 Ensaio de Desgaste por Microabrasão em Abrasômetro de Esfera Rotativa

A partir da busca por reproduzir e caracterizar em laboratório fenômenos de desgaste por abrasão, em 1996, foi idealizado por Rutherford e Hutchings o ensaio de microabrasão por esfera rotativa, ou também chamado de ensaio de desgaste de esfera sobre placa.

De acordo com Cozza (2006), o abrasômetro de esfera rotativa fixa tem como princípio de funcionamento a aplicação de uma força normal à esfera, que é pressionada contra o corpo de prova. A esfera está girando, tendo então um movimento relativo em relação ao corpo de prova. O contato do corpo de prova e esfera juntamente com o movimento relativo desta, origina uma força tangencial ou melhor dizendo, uma força de atrito entre os dois corpos. Sabe-se que a força de atrito é proporcional a força normal aplicada. Além disso existe sobre a esfera um gotejador que aplica a suspensão abrasiva entre a esfera e a amostra. A Figura 4 mostra claramente as forças envolvidas:

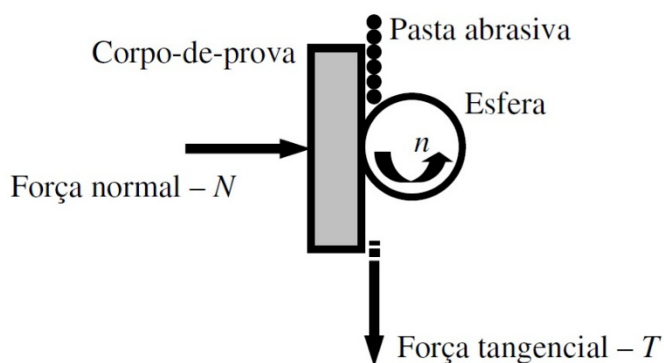


Figura 4 – Princípio do ensaio de desgaste por microabrasão de esfera rotativa (COZZA, 2009)

O abrasômetro de esfera rotativa fixa tem como principais componentes: um braço metálico (Figura 5) preso a um eixo (A), que recebe uma força peso (B) e, a partir do princípio de braço de alavanca, transmite ao pivô um momento que de forma inversa,

transmite a placa uma força normal (C); um motor acoplado a um eixo com dois mancais entre os quais está a esfera. O motor tem velocidade controlada e geralmente registra por um contador eletrônico o número de giros; uma esfera que é fixada entre os dois eixos a partir de um mecanismo de regulação; uma bomba peristáltica que alimenta a suspensão abrasiva com uma vazão constante.

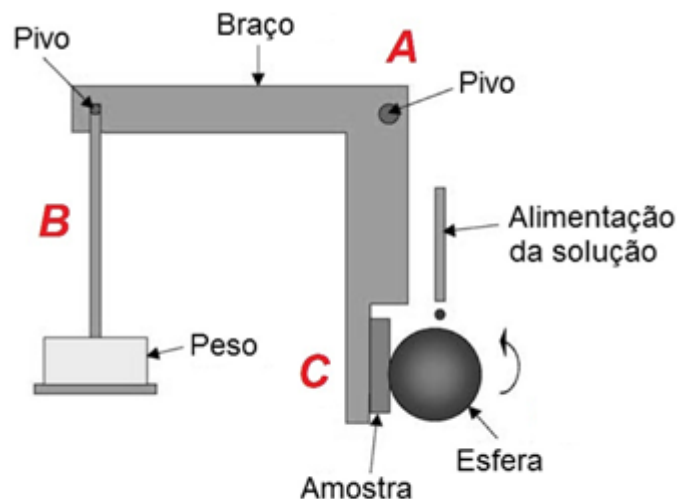


Figura 5 – Representação esquemática da montagem do braço metálico que origina a força normal (F_N). Modificado de (GEE, 2003)

Outro ponto a considerar são as condições do ensaio, que influenciam diretamente os resultados. As alterações desses parâmetros afetam diretamente a formação da calota de desgaste, ou seja, afeta diretamente a condição do desgaste.

Os parâmetros de ensaio que, de acordo com Cozza (2006) são variáveis independentes e que podem ser controladas são: a força normal, distância de deslizamento, diâmetro da esfera de ensaio, rotação da esfera de ensaio, concentração da suspensão abrasiva, viscosidade do fluido da suspensão abrasiva, características das partículas abrasivas e a vazão da suspensão abrasiva. O tempo de ensaio não chega a ser uma variável independente, por estar associado à distância de deslizamento que juntamente com a velocidade de giro da esfera imposta pelo motor, definem o tempo do ensaio.

Neste ensaio, a partir do diâmetro das calotas geradas, é possível obter dados a partir da Equação 1, que em conjunto com a Equação 2 e Equação 3 (RUTHERFORD, 1997), possibilitam a obtenção da taxa teórica de desgaste e do coeficiente de desgaste do material (K).

$$Q_D = \frac{\pi * D^4}{64 * R} \quad 1$$

$$Q_T = \frac{Q_D}{S} \quad 2$$

$$K = \frac{Q_T}{F_N} \quad 3$$

Sendo:

Q_D - volume removido [m³]

D – diâmetro da calota [m]

R – raio da esfera [m]

Q_T - taxa de desgaste [m³/m]

S - distância percorrida [m]

K - coeficiente de desgaste do material [m³/(N*m)]

F_N – força normal aplicada à superfície da amostra [N]

2.4 Estações Elevatórias de ETA's

As estações elevatórias têm a função de transportar para as estações de tratamento as águas captadas de algum manancial, seja um curso d'água natural ou um reservatório. Ações de eficiência nesse processo têm impacto direto nos custos, sendo o processo que mais consome energia em todo o circuito de captação e tratamento de água. Com a necessidade, cada vez maior, de transportar água por

grandes elevações e distâncias, juntamente com a integração dos sistemas de abastecimento entre diversos municípios, as estações elevatórias tornam-se componente chave no sistema de abastecimento e conseqüentemente foco da redução de gastos (ALMEIDA, 2010).

2.4.1 Configurações Básicas

As estações elevatórias são definidas, entre outros pontos, pelos tipos de bombas e por seus motores acoplados que formam os principais aspectos de operação e manutenção. Com isso, as estações elevatórias recebem também o nome de poços de bombeamento ou estações de bombeamento, os quais são utilizados para injetar energia no sistema para transportar e elevar águas provenientes de zonas de drenagem. Estes equipamentos permitem ultrapassar as dificuldades de topografia do terreno, tornando possível a ligação a outras estações e, conseqüentemente, à rede de distribuição (ReCESA,2018).

As estações elevatórias são formadas por outros componentes, além do conjunto motor-bomba, sendo esses essenciais para perfeito funcionamento do sistema. São eles:

- barragem, vertedor ou enrocamento;
- câmara de tomada de água equipada com gradagem, válvula mural e *by-pass*;
- desarenador;
- câmara de bombeamento com grupos elevatórios em reserva ativa;
- caixa de válvulas com seccionadores, válvulas anti-retorno e de evacuação do coletor;
- quadro elétrico de comando.

Os barriletes de recalque, nas saídas dos conjuntos motor-bomba, devem ser projetados com diâmetros e disposição que reduzam as perdas de carga localizadas nas conexões e que não dificultem o fluxo da água pela adutora (OSWALDO, 2017).

Outro detalhe importante nas estações elevatórias de água é que os conjuntos motor-bomba que estejam operando em paralelo sejam sempre iguais, para evitar que um conjunto motor-bomba não prejudique, ou até mesmo, impeça o funcionamento de outro.

Valores de vazão e altura manométrica geram uma curva que representa o sistema, o que viabiliza a utilização de vários tipos de bombas de diferentes marcas e modelos. Cabe ao projetista analisar cuidadosamente todos os equipamentos e adotar a bomba que apresenta o melhor rendimento, de acordo com as características da estação, com o intuito de se obter o máximo de eficiência gerando o ponto de operação da bomba a partir da interseção da curva da bomba com a curva do sistema (GOMES, 2009).

Com o passar do tempo, há formação de incrustações na superfície interna das tubulações devido a diversos fatores, como a dureza, alcalinidade, acidez, presença de sólidos em suspensão, velocidade da água, temperatura e estado da superfície interna dos tubos. Essas incrustações, que fatalmente ocorrem ao longo do tempo na tubulação, aumentam a rugosidade das paredes internas dos tubos, acarretando redução na capacidade de escoamento, aumento da perda de carga e, conseqüentemente, redução da eficiência da estação elevatória, com o acréscimo no consumo de energia elétrica e redução na vazão de recalque. De acordo com Oswaldo (2017), para a solução desses problemas causados pelo envelhecimento das tubulações, podem ser adotadas as seguintes ações:

- construção de uma nova adutora no lugar da existente
- construção de uma adutora em paralelo
- redimensionamento e repotencialização dos conjuntos motor-bomba
- instalação de bombas em série na adutora (“*boosters*”)
- limpeza e desobstrução da linha de recalque
- revestimento “*in situ*” das tubulações existentes, para sua plena recuperação

Outro problema recorrente, é o acúmulo de ar no interior das tubulações de conduto forçado, que promove a redução na seção de escoamento, acarretando um decréscimo da capacidade de adução e acréscimo da perda de carga. O ar no interior das tubulações é algo extremamente indesejável e pode se acumular por diversos motivos, dentre eles a topografia do terreno por onde passa a adutora, falta de instalações de dispositivos do tipo ventosa nas partes mais altas da tubulação. Cabe aos projetistas adotarem a quantidade e os locais corretos para a instalação das ventosas, em uma linha de recalque de água, a fim de se evitar problemas futuros e a baixa eficiência energética das estações elevatórias de água (AQUINO, 2013).

Na tubulação de recalque deverão ser colocados uma válvula de retenção e um registro de gaveta. A válvula de retenção tem a finalidade de impedir que o líquido retorne quando a bomba for desligada, além de servir de proteção contra o excesso de pressão, impedindo ao mesmo tempo que a bomba gire em sentido contrário ao da sua rotação. A válvula de retenção deve ser colocada entre a válvula de gaveta e a bomba, permitindo assim, inspecioná-la quando necessário (ReCESA, 2008).

Assim, com base nesses aspectos, uma estação elevatória trata-se de um conjunto de edificações, instalações e equipamentos destinados a abrigar, proteger, operar, controlar e manter os conjuntos elevatórios para promover o recalque da água. São estruturas indispensáveis num sistema de abastecimento de água que não possui condições de ter seu abastecimento totalmente realizado pela ação da gravidade.

2.4.2 Modelos de Bombas Utilizadas

A seleção correta das bombas contribui para economia na operação, o que pode minimizar o custo da água (ReCESA, 2008). As bombas podem ser classificadas nas seguintes classes principais: bombas volumétricas e turbobombas.

As bombas volumétricas, também chamadas de bombas tipo pistão ou bombas de deslocamento positivo, são raramente utilizadas em sistemas de abastecimento de água. Sua aplicação ocorre quando a faixa de aplicação das turbobombas não consegue alcançar as necessidades de um dado sistema (ReCESA, 2008). Estas

bombas possuem câmaras e órgão propulsor instalado em seu interior que produzem variações do volume interno, provocando também variações de pressão responsáveis pela aspiração e recalque do fluido.

As turbobombas, também chamadas de bombas hidráulicas ou bombas cinéticas, são as mais usuais nos sistemas de abastecimento de água. Segundo descrito por Carvalho (1992), as turbobombas são aquelas que se caracterizam pela existência de um rotor dotado de palhetas. Essas palhetas estão em contato com o fluido, sendo o rotor acionado por uma fonte externa de energia, a ação da força centrífuga e da força de sustentação produzida pelo escoamento do fluido em torno das palhetas, provocam uma depressão à entrada do rotor que aspira o fluido e uma sobrepressão à saída do mesmo, realizando o recalque. As turbobombas possuem como peça principal o rotor, que segundo Tsutiya (2006) podem ser classificados com base em três critérios fundamentais: quanto à admissão do fluido, simples ou dupla sucção; quanto às paredes do rotor, sendo rotor aberto, semiaberto ou fechado; quanto à direção de saída do líquido, podendo ser de fluxo axial, fluxo radial ou fluxo misto.

Neste contexto, para compreender as principais características das bombas, é relevante remeter-se à potência e rendimento da bomba, pois seu desempenho está relacionado com a sua potência, rendimento, vazão e altura manométrica. (ReCESA,2008). A potência de um conjunto elevatório, ou seja, motor-bomba, é definida de maneira que deverá vencer a diferença de nível entre o ponto de sucção e o de recalque máximo.

2.4.3 Eficiência Energética de ETA's

A energia elétrica utilizada nos sistemas de abastecimento de água, é um insumo muito necessário para o transporte da mesma, desde a fonte de captação até as estações de tratamento, onde torna-se a água potável para a sua distribuição aos consumidores. Entretanto, deve-se considerar também o alto consumo de energia gasta nesse tratamento e, em consequência, o desperdício de energia proveniente do desperdício da água, aumentando as despesas.

Os sistemas de abastecimento e de esgotamento sanitário são responsáveis por aproximadamente 3% da energia consumida no mundo. No Brasil, a situação não é diferente, de acordo com dados de 2008 do Programa Nacional de Conservação de Energia para o setor de Saneamento (PROCEL, 2008), entre 2 % e 3 % do consumo total de energia elétrica no nosso país, o equivalente a cerca de 10 bilhões de kWh/ano, são consumidos por prestadoras de serviços de água e esgotamento sanitário.

As estações elevatórias são responsáveis por aproximadamente 90% dos encargos com energia elétrica das ETA's (ALMEIDA, 2010). Sendo responsável por um percentual tão alto, é de se esperar que as estações elevatórias, sobretudo o conjunto motor-bomba, se torne alvo de estudos e melhorias a fim de se desenvolver alternativas e métodos para melhorar seu desempenho.

Há diferentes demandas de água durante os dias, fazendo-se necessária a variação do volume de adução das captações. Acontece hoje em dia diferentes métodos para regular a vazão aduzida, sendo que os mais usados são grandes inimigos da eficiência energética, por causarem desperdício, desgaste dos componentes ou até mesmo retorno do volume sobressalente aos corpos d'água.

Segundo Gomes (2009), nos vários métodos de controle de vazão em sistemas de bombeamento, as técnicas mais usadas controlam o fluxo ainda mantendo a velocidade constante do conjunto motor-bomba (processos liga-desliga, *by-pass* ou válvula de estrangulamento). Todos esses processos provocam desperdício de energia. No método liga-desliga, o acionamento/desligamento do motor ocorre quando o parâmetro de decisão atinge limites mínimo e máximo estabelecidos. Tal procedimento pode comprometer as partes elétricas e mecânicas, devido às elevadas correntes de partida. Ocorrendo diversas operações em curtos intervalos de tempo, esse sistema torna-se altamente ineficiente e gera muita manutenção (ALBANEZE, 2012). O método *by-pass* consiste na instalação de uma tubulação que tem a função de retornar parte da água da tubulação de recalque para o reservatório de sucção.

Com o auxílio de uma válvula, aumenta-se ou diminui-se a vazão de retorno. Este método é ineficiente, pois um mesmo volume de água passa pelo conjunto motor-

bomba diversas vezes a cada período do sistema, sendo agregado o valor de energia neste m³ recalcado, portanto elevando o valor do custo de bombeamento. O emprego de válvula de controle (ou de estrangulamento), adequa a vazão por meio da abertura ou do fechamento parcial de uma válvula instalada em série com a bomba. Este método ocasiona o desgaste das peças envolvidas, aumentando o gasto com manutenção destes equipamentos e por consequência o custo do m³ recalcado. A válvula estrangulada acarreta uma perda de carga localizada adicional a jusante da bomba, alterando a curva do sistema, ou seja, aumentando a altura manométrica de recalque.

O método com acionamento eletrônico promove o controle para movimentar o conjunto motor-bomba em velocidade variável, permitindo maior precisão do controle da vazão. Este método usa a energia necessária para cada vazão de recalque, gerando uma significativa economia de energia, quando se compara com os outros métodos mais comumente utilizados (PEDROSA, 2015).

Segundo o INEE (2001), a conservação e o uso eficiente da energia elétrica dependem dos produtores e consumidores de eletricidade. Ao sistema elétrico cabe reduzir as perdas nas etapas de geração, transmissão e distribuição, assim como desenvolver projetos que tenham a conservação como premissa. Nos diferentes segmentos de consumo, é necessário eliminar o desperdício e ineficiência, além de aplicar novas tecnologias. A tendência nos países mais desenvolvidos é de realização de esforços cada vez maiores no sentido de aumentar a eficiência energética da ETA, a partir de uso intensivo de novas tecnologias.

2.5 Aço Inoxidável

A elevada resistência à corrosão é propriedade que difere o aço inoxidável do aço comum. Essa liga metálica tem resistência garantida pela adição de alguns componentes químicos na sua composição, sendo o cromo o principal deles. Em 1912, o inglês Harry Brearly ao fazer ensaios metalográficos com uma liga ferro-cromo com 13% de cromo, pode observar que essa liga era resistente aos reagentes utilizados na metalografia de sua época, assim nomeou a liga como "*stainless steel*",

ou traduzido “aço sem manchas”. Assim, surgiu o aço inox, que é hoje classificado com um aço que contém ao menos 10,5% de cromo em sua composição química, que garante sua resistência à corrosão (TRIDAPALLI, 2013).

A corrosão acontece quando o metal reage com o oxigênio do ar ou da água formando uma camada de óxido de ferro na sua superfície. Essa camada de óxido não é aderente e é bem porosa, facilitando a continuação da corrosão da superfície do metal. E é exatamente nesse processo que a camada passiva do aço inoxidável age tornando-o resistente a corrosão.

A camada passiva que protege o aço inoxidável é formada pela combinação do oxigênio do ar com o cromo, que surge espontaneamente de forma instantânea por conta da afinidade entre cromo e oxigênio. É uma camada impermeável e insolúvel, que além de muito estável é contínua, fazendo-se presente em toda a superfície do aço garantindo a proteção contra corrosão no meio agressivo (COSTA, 2012).

Existem diversos tipos de aços inoxidáveis, eles são agrupados em três famílias de acordo com a estrutura predominante na liga (ferrita, austenita e martensita). A liga predominante interfere diretamente em algumas propriedades do aço inox, sendo assim os aços inoxidáveis são classificados como pertencentes aos grupos dos austeníticos, dos ferríticos e dos martensíticos.

2.5.1 Aço AISI 304

O aço AISI 304 é um metal com grande gama de usos, estando presente em vários equipamentos e acessórios do dia a dia, de utensílios domésticos a peças industriais. É bastante utilizado em carcaças e rotores de bombas de adução de água bruta, pois apresentam maior vida útil e baixas manutenções, por apresentarem maior resistência a abrasão e erosão por cavitação.

O aço AISI 304 é pertencente ao grupo de aços inoxidáveis austeníticos. De acordo com a Tabela 1, é composto basicamente 18%~20% de cromo e 8%~10,5% de níquel e teor de carbono limitado a 0,08%. A adição de níquel, dependendo da quantidade, possibilita a transformação da estrutura ferrítica em austenítica, que é o

caso, garantindo algumas mudanças de propriedades favoráveis a determinados usos como por exemplo aumento da resistência a corrosão em meios agressivos.

Tabela 1 - Composição química do aço AISI 304 (GERDAU, 2003)

AISI	COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%) EM MASSA						
	C Máx.	Mn Máx.	Si Máx.	P Máx.	S Máx.	Cr	Ni
304	0,08	2,00	0,75	0,045	0,030	18,00 - 20,00	8,00 - 10,50

Os aços inoxidáveis austeníticos são chamados também de série 300, são aços não magnéticos formados com estrutura cristalina cúbica de face centrada graças a presença do níquel, manganês e nitrogênio que atuam como fortes estabilizadores da austenita, que constitui uma solução sólida de carbono no ferro gama (COSTA, 2012). Apresentam boas propriedades mecânicas, boa soldabilidade, trabalhabilidade a frio, resistência à corrosão e podem ser endurecidos por deformação. Do ponto de vista de resistência à corrosão, os austeníticos têm, em geral, melhor comportamento que os demais (COSTA, 2012).

A Figura 6 mostra os aços inoxidáveis austeníticos.

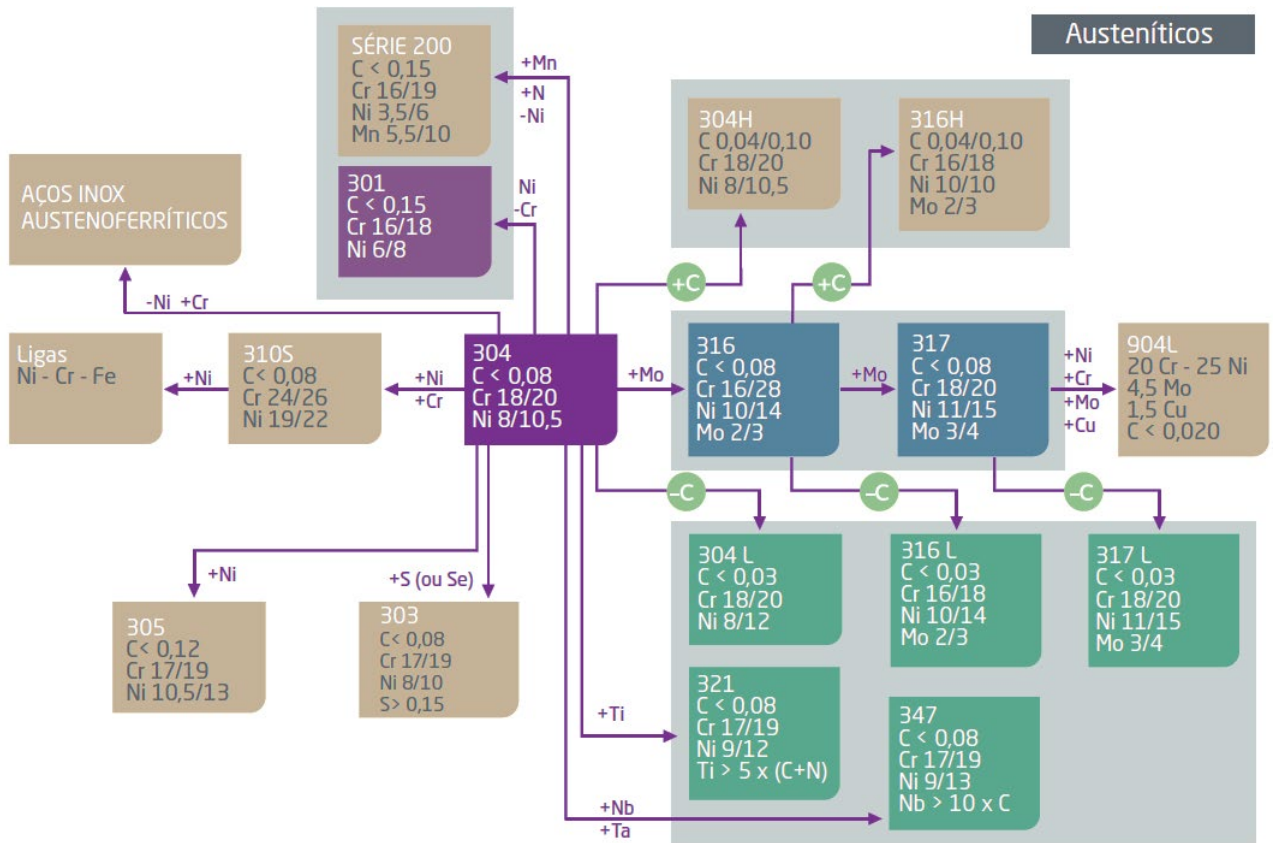


Figura 6 – Aços inoxidáveis da série 300 – Austeníticos (APERAM, 2015)

3 METODOLOGIA

3.1 Caracterização da Área de Estudo

O Rio Acre é um dos rios pertencentes a bacia Amazônica, tem nascente localizada na fronteira entre Brasil e Peru, a partir de onde percorre 1.190km até sua foz no rio Purus na cidade Boca do Acre. Assim como alguns outros rios dessa bacia, apresenta águas brancas, de aspecto barrento, por conta de seu percurso em áreas com grandes volumes de erosão e várzeas extensas anualmente alagadas, que propiciam o carreamento de partículas de solo. A média pluviométrica anual na região varia de 1.525mm até 2.067mm, de acordo com a Figura 7. A consequente variação entre cheia e seca do Rio Acre altera suas características hidrodinâmicas, e ao encher favorece o transporte de sedimentos aumentando sua turbidez e teor de sólidos suspensos.

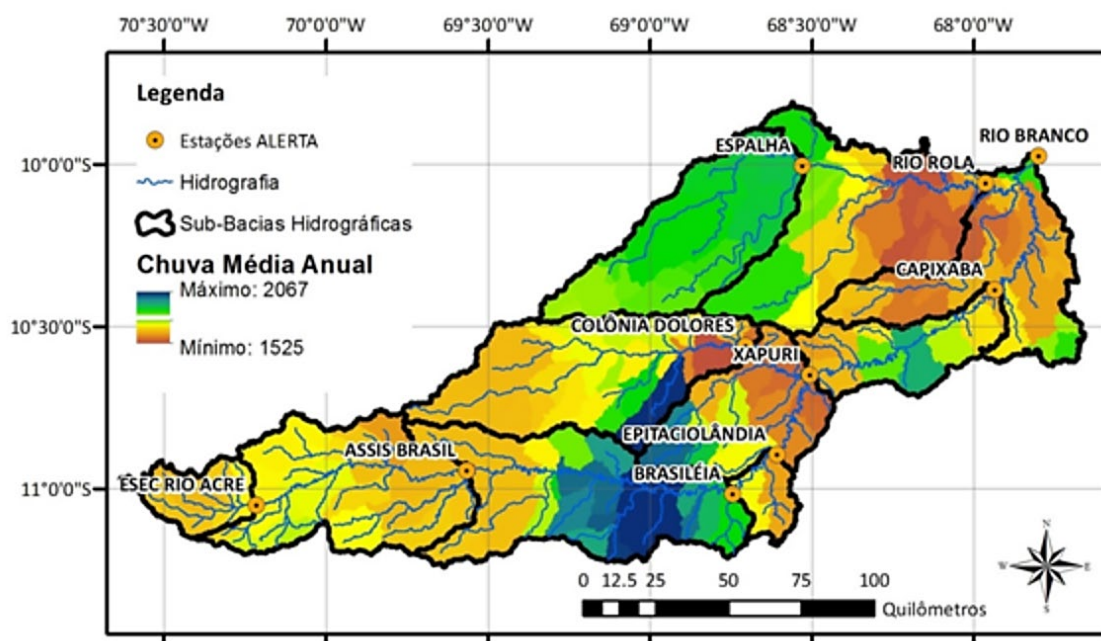


Figura 7 – Precipitação total anual média da bacia do Rio Acre (CPRM, acessado em 06/06/2019)

3.1.1 Variação da Concentração de Sólidos Suspensos do Rio Acre

A concentração de sólidos suspensos é fator determinante na escolha das concentrações a serem estudadas nesse trabalho. A variação da concentração de

sedimentos do Rio Acre é muito ampla durante o ano e de acordo com dados da estação fluviométrica 13600002 da Agência Nacional de Águas (ANA), instalada na cidade de Rio Branco que mede a descarga sólida desde dezembro de 1987, a concentração de sólidos suspensos varia de um máximo de 998mg/ℓ em épocas de cheia a um mínimo de 60mg/ℓ na época de estiagem. Há ainda a possibilidade de aumento desses valores em consequência de sucção de sedimentos de fundo ou aumento da turbulência nos bocais de sucção (LATUF *et al.*, 2015; SERRANO, 2017)

3.1.2 Variação de Cota do Rio Acre e da Rotação da Bomba

A cota do Rio Acre é fator determinante na carga de sedimentos, uma vez que as cheias promovem maiores erosões de margem, maior arraste de sedimentos de fundo, além do carreamento de partículas superficiais pelas águas de chuva que não infiltram no solo. O gráfico da Figura 8 apresenta uma série histórica de 1967 a 2015 das cotas do Rio Acre na região de Rio Branco, que caracteriza bem os meses de cheia e de seca do rio.

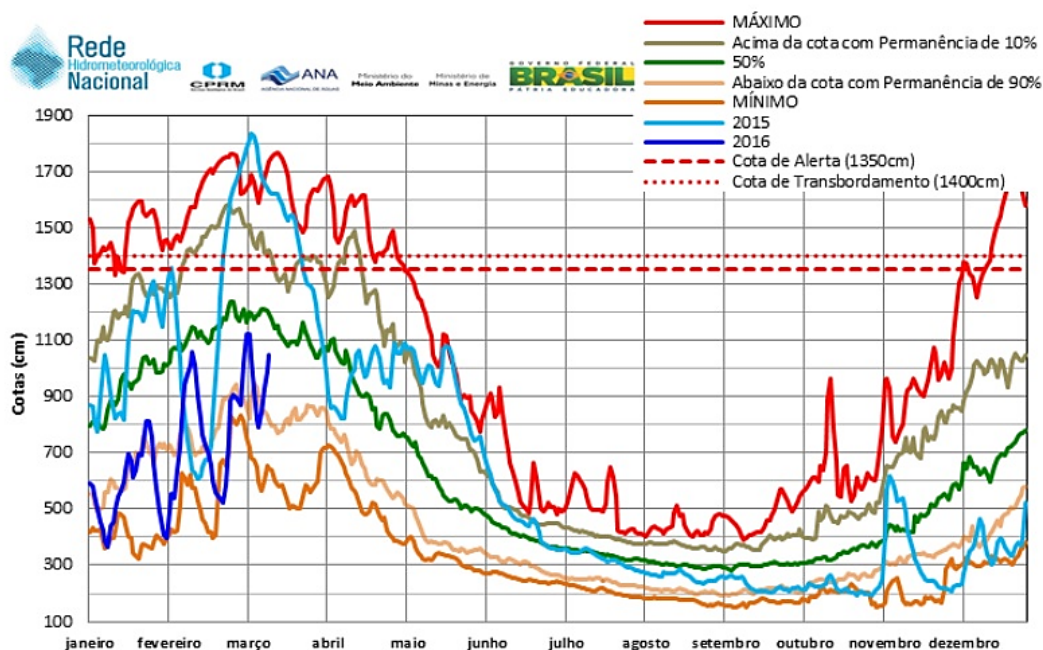


Figura 8 – Série histórica de níveis do Rio Acre na região de Rio Branco (BARBORA, 2016)

As cotas médias utilizadas nesse trabalho foram obtidas com base no estudo de Duarte & Gioda (2014). A variação de rotação da bomba foi fixada em 100%, 95%, 90%, 85% e 80%, conforme estudo de Serrano (2017). Variar a rotação é possível de acordo com a alteração da cota do rio, que ao subir diminui a altura geométrica a ser vencida pelas bombas.

Serão vistas no item 3.7.2 as influências da variação da rotação da bomba na velocidade relativa entre fluido e rotor e consequente alteração da força de arrasto nas pás do rotor. Com isso, é possível determinar o desgaste do rotor em função da concentração de sedimentos que, por sua vez, é função da cota do rio Acre.

3.1.3 Sedimento e Caracterização das Partículas Abrasivas

Os sedimentos para este estudo foram coletados do desarenador da ETA II, estrutura que fica após o bombeamento. A distribuição granulométrica dos grãos foi obtida por Serrano (2017) a partir da combinação do método de sedimentação e peneiramento, seguindo os prescritos da norma ABNT NBR 7.181 de 1984. Segue na Figura 9 a análise granulométrica. A curva evidencia e permite classificar o material como areia, perante classificação da norma ABNT NBR 6.502 de 1995.

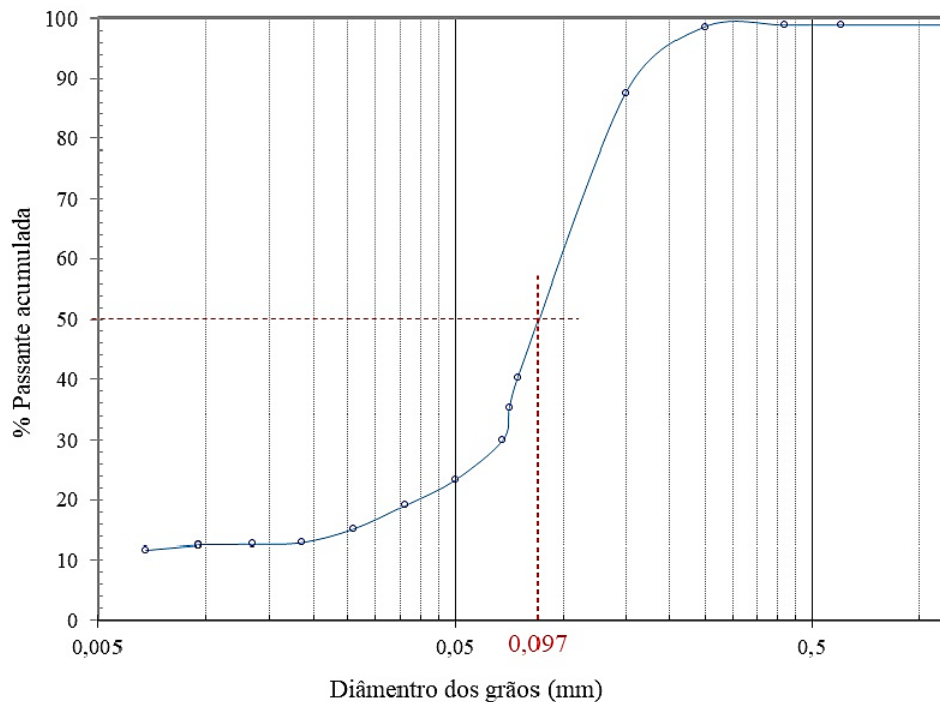


Figura 9 – Curva granulométrica dos sedimentos do Rio Acre (SERRANO, 2017; SERRANO *et al.*, 2018^a e 2018b)

A curva revela que a granulometria de 60% dos grãos varia de 0,075mm a 0,42mm e 40% de grãos menores que 0,075mm, com $D_{50} = 0,097$ mm.

A análise morfológica do sedimento feita por Serrano (2017), baseou-se em análise obtida por meio de microscópio eletrônico de varredura e posterior tratamento de imagem com uso do *software* ImgeJ. Essa análise classificou os grãos como semiangulares e semiarredondados, característico de solos jovens e arenosos, apresentando alto poder abrasivo em razão das pontas afiadas e grande quantidade de grãos de quartzo (SERRANO, 2017).

3.2 Preparo das Amostras de Aço AISI 304

As amostras de aço inoxidável foram obtidas junto ao Laboratório de Hidráulica da Universidade Federal de Ouro Preto, oriundas de estudos anteriores. São discos de espessura $e=6$ mm, cortados em um torno mecânico a partir de uma barra de seção circular com 50mm de diâmetro. Inicialmente as amostras apresentavam as marcas

do corte e algumas outras imperfeições, sendo necessário o preparo prévio para os ensaios.

De acordo com Rohde (2010), o lixamento é um dos processos mais demorados no preparo de amostras e tem por objetivo eliminar riscos e marcas mais profundas da superfície do metal, preparando a amostra para o polimento. A Figura 10 mostra a sequência mais adequada para o lixamento.

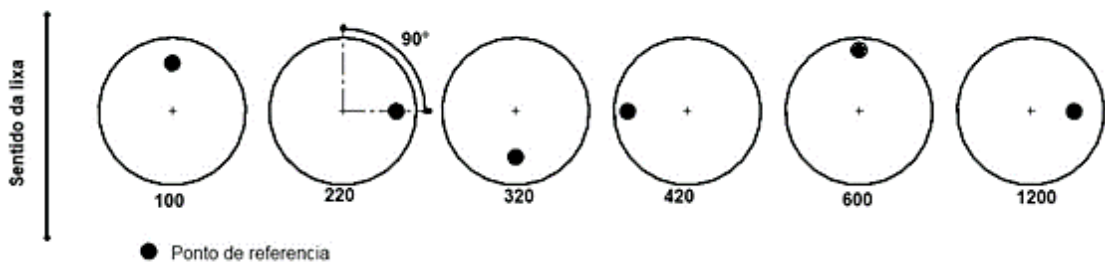


Figura 10 - Representação esquemática do método de lixamento com trabalho em sentidos alternados (ROHDE, 2010)

Inicialmente as amostras foram limpas com uso de álcool e secadas no secador. Em um primeiro momento as amostras foram levadas para uma lixadeira industrial de cinta, passando por lixas #80, #100 e #120, que são lixas de granulometria mais grossa. Essas lixas são capazes de remover as marcas do torneamento e garantir uma superfície visualmente mais lisa (Figura 11).

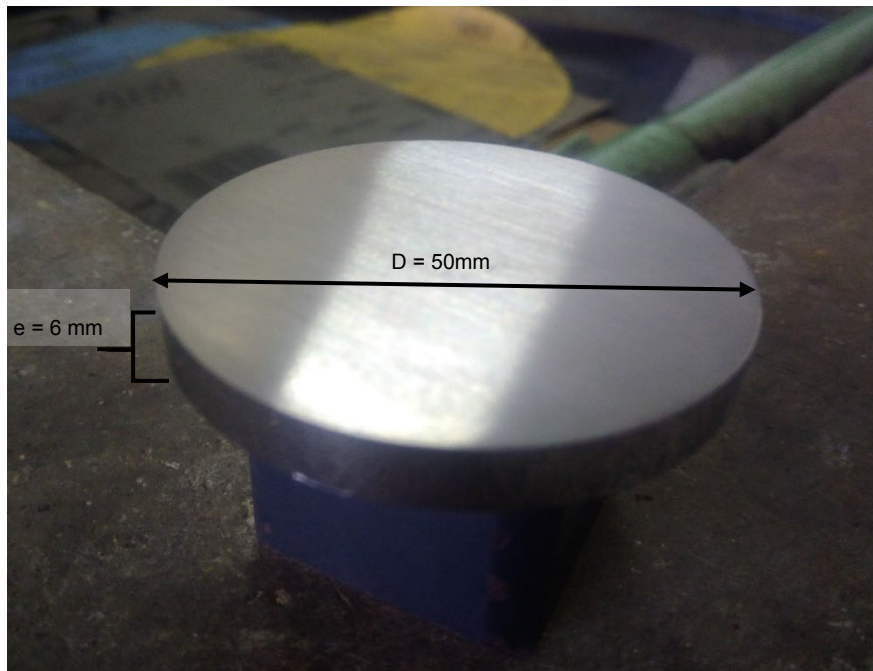


Figura 11 – Amostra após lixamento com lixas #80, #100 e #120 (AUTOR, 2019)

Posteriormente as amostras foram levadas para uma bancada de vidro, com gotejamento de água. As lixas foram fixadas no vidro e seguindo o arranjo da Figura 10, as amostras foram lixadas em sequência nas lixas #220, #400, #600, #1200 e #1500. Quando a peça apresentava homogeneidade nos riscos do lixamento em um mesmo sentido, a amostra era girada 90° e utilizava-se a próxima lixa de granulometria menor.

Ao chegar na lixa #1500, as amostras já apresentavam uma superfície quase espelhada, passando-se assim para o polimento. Com ajuda de uma politriz de bancada (Figura 12) e uso de pasta de alumina de 1 μm a 10%, as amostras foram polidas seguindo os cuidados e metodologia de Rohde (2010).



Figura 12 – Politriz de bancada (AUTOR, 2019)

Após o polimento, as amostras foram novamente limpas para remoção de vestígios dos abrasivos, secas e armazenadas até o ensaio em um dessecador para evitar reações com o ar. Ao fim do polimento as amostras apresentam acabamento perfeitamente espelhado (Figura 13).

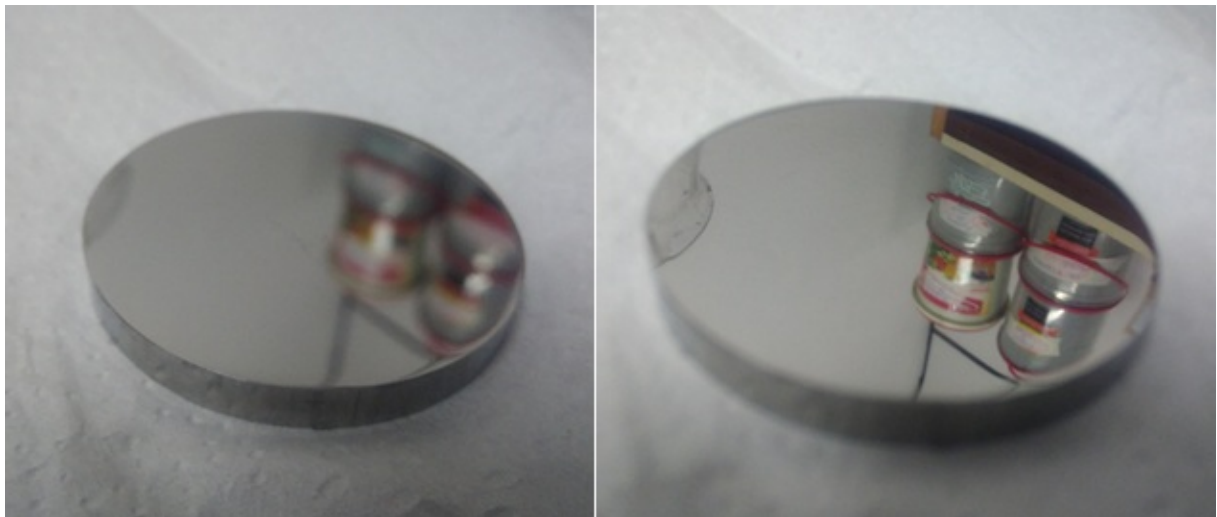


Figura 13 – Amostra polida, com detalhe no acabamento espelhado (AUTOR, 2019)

3.3 Preparação da Suspensão Abrasiva

Os sedimentos coletados são separados de acordo com a ordem de ensaio e preparados antes do mesmo, sendo três pesagens de sedimento para cada concentração. Com uso de uma balança de precisão (Figura 14) o sedimento é pesado para ser misturado a um litro de água destilada e compor as misturas de 0,01%, 0,02%, 0,03%, 0,05% e 0,1%, ou seja, 1 g/l, 2 g/l, 3 g/l, 5 g/l e 10 g/l.



Figura 14 – Balança de precisão com 1g e 10g com exatidão de quatro casas decimais (AUTOR, 2019)

Após a pesagem e separação, os sedimentos são misturados manualmente a um litro de água destilada e durante o ensaio, segue misturando-se por um agitador magnético de velocidade variável, a fim de evitar a sedimentação e consequente variação da concentração durante o ensaio.

Além dos ensaios com o sedimento, é necessário a utilização de carbeto de silício (SiC) (Figura 15), que é um abrasivo padrão utilizado para obtenção da abrasividade comparada ao sedimento do Rio Acre, seguindo, assim, o mesmo

processo utilizado com o sedimento, que é a pesagem para uma mistura de concentração de 0,1%, 10 gramas para cada litro de água destilada.



Figura 15 – Carbeto de silício antes da pesagem (AUTOR, 2019)

3.4 Ensaio de Abrasão em Abrasômetro de Esfera Rotativa

Nesta etapa foi utilizado o equipamento de esfera rotativa do Laboratório de Microabrasão da Universidade Federal de Ouro Preto. O abrasômetro em questão possui configuração apresentada na Figura 16, sendo seus componentes o suporte para massas (A), um contrapeso (B), controle de travamento da esfera (C), a esfera (D), suporte para afixação da amostra (E), bomba peristáltica de vazão constante (F) e um motor de velocidade controlada (G).

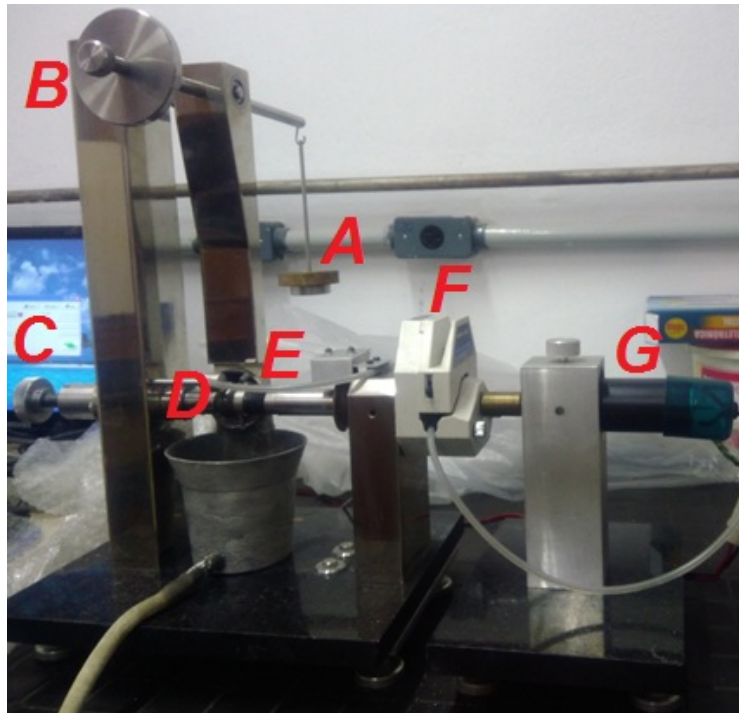


Figura 16 – Abrasômetro de esfera rotativa (AUTOR, 2019)

Para cada concentração foram realizados 3 ensaios, assim como para o carbetto de silício, totalizando 18 ensaios.

Os ensaios foram realizados um a um com os parâmetros fixos. A força normal aplicada foi de 3N, que, de acordo com Serrano (2017), favorece a impressão das calotas, que apresentam melhor definição das bordas, facilitando a determinação do diâmetro. A esfera de aço AISI 52100 do abrasômetro tem diâmetro de 25,0mm. O motor tem velocidade fixada em 100rpm. A distância de deslizamento definida foi de 180 metros, novamente seguindo os parâmetros de Serrano (2017) a fim de comparar de resultados. O tempo de ensaio é obtido por meio da correlação entre diâmetro da esfera, velocidade do motor e distância de deslizamento, que foi arredondado para 23 minutos e obtido por meio da Equação 4.

$$T = \frac{\text{Distância}}{\text{Velocidade}} = \frac{180m}{100rpm} = \frac{180m}{100 * 2\pi * 0,01252m/minuto} = 22,86 \text{ minutos} \quad 4$$

Seguindo a preparação do ensaio, a suspensão abrasiva é colocada no agitador magnético e o tubo de sucção da bomba é inserido na mistura. A amostra é cuidadosamente colocada no suporte de modo que não haja interferência e sobreposição em outras calotas já ensaiadas, então o ensaio é iniciado. Na Figura 17 é possível observar no detalhe, a rotação do ensaio, no qual a esfera entra em contato com a amostra de aço AISI 304 sob uma vazão constante de suspensão abrasiva.

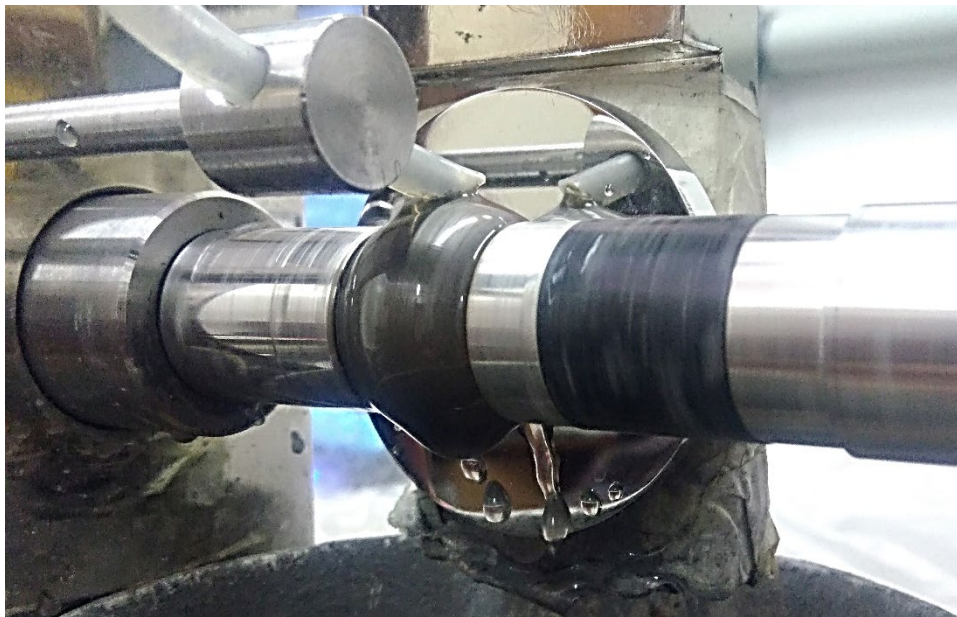


Figura 17 –Execução do ensaio de abrasão em mecanismo de esfera rotativa (AUTOR, 2019)

3.5 Análise das Calotas de Desgaste com Microscópio Eletrônico de Varredura

Após ensaiadas as amostras são analisadas em um Microscópio Eletrônico de Varredura- MEV, um equipamento sofisticado que permite obtenção de imagens em alta resolução com ampliações que podem chegar a até 500.000 vezes.

3.6 Características do Rotor Analisado

O foco deste estudo é o desgaste por abrasão no rotor, por isso, com o intuito de comparar resultados o modelo de rotor analisado foi o idealizado e calculado por

Serrano (2017). O modelo foi concebido com a determinação dos parâmetros construtivos do rotor obtidos a partir de um algoritmo computacional que relaciona a vazão, a altura manométrica e a rotação específica. Esse algoritmo foi desenvolvido e descrito por Palomino (2017), sendo possível obter as principais características de dimensionamento de um rotor a partir da entrada de condições de projetos que são processadas pelo algoritmo e que entrega como resultado tabelas, gráficos, equações e coeficientes de correlação linear.

Serrano (2017) utilizou para calcular as características do rotor os dados da EEAB da ETA II de Rio Branco - AC, que trabalha com uma vazão de 1080m³/h por bomba, acoplada em motor elétrico de rotação 1180rpm e altura geométrica somada as perdas de carga no valor de 25 mca. A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos:

Tabela 2 – Características construtivas do rotor calculadas a partir do algoritmo de Palomino (SERRANO , 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 (β_1)	17,45°
Ângulo da pá na saída do rotor (β_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

3.7 Estimativas do Desgaste do Rotor

O desgaste é calculado com base no volume teórico removido, utilizando a equação modificada de Archard (SERRANO *et al.*, 2018b), conforme a Equação 5:

$$Q = K * F_N * S \quad 5$$

Sendo:

Q – volume removido [m³]

K – coeficiente de desgaste específico do material [m³/(N*m)]

F_N – força normal aplicada em uma seção da pá [N]

S – distância de deslizamento [m]

3.7.1 Distância Relativa de Deslizamento

O cálculo da distância relativa de deslizamento, é feito a partir da Equação 6, com base na velocidade relativa do líquido que passa por uma seção da pá do rotor (SERRANO *et al.*, 2018b).

$$S = V * t \quad 6$$

Sendo:

V – velocidade relativa do líquido [m/s]

t – tempo de funcionamento da bomba [s]

3.7.2 Campos de Velocidade do Rotor em Estudo

Com base nos dados da Tabela 2, Serrano (2017) determinou o campo de velocidades relativas do líquido em relação as pás do rotor. Em função da variação de rotação da bomba de acordo com a altura de elevação, que varia com a cota do rio e mantendo-se fixadas a vazão e a rotação específica, ele simulou 5 condições gerando as velocidades relativas apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Variação da velocidade do líquido em função da variação de rotação da bomba
SERRANO, 2017)

	100%	95%	90%	85%	80%
	1180 rpm	1121 rpm	1062 rpm	1003 rpm	944 rpm
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

3.7.3 Forças Atuantes nas Pás do Rotor em Estudo

Com base nas características obtidas da Tabela 2 e os valores de velocidade da Tabela 3, Serrano (2017) determinou um perfil de pá de projeto (Figura 18).

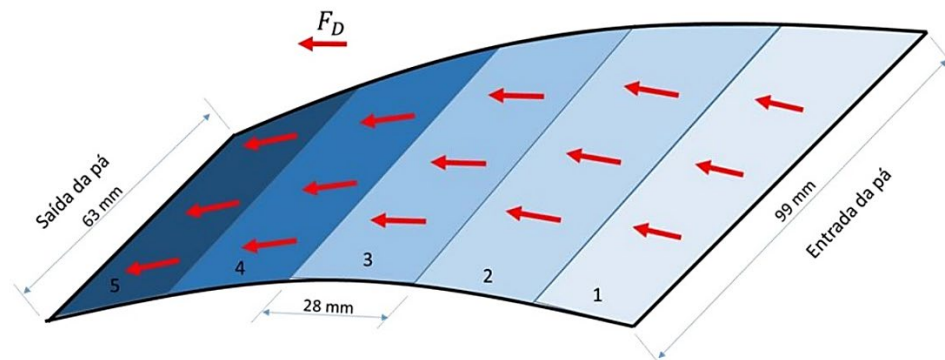


Figura 18 – Pá do rotor em estudo delimitada em 5 seções (SERRANO, 2017)

A partir desse perfil, no qual foram definidas 5 seções, foi feito o cálculo da área de cada seção e determinada a força de arrasto em cada uma delas. Os valores obtidos seguem na Tabela 4:

Tabela 4 – Forças de arrasto por seção (SERRANO, 2017)

Seção	Área de cada seção da pá				Variação das forças sobre a pá				
	b'1 [mm]	b'2 [mm]	x [mm]	A [mm ²]	A [m ²]	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

No Figura 19, Serrano (2017) mostra também, que há variação da força de arrasto em função do raio médio de cada seção do rotor de projeto:

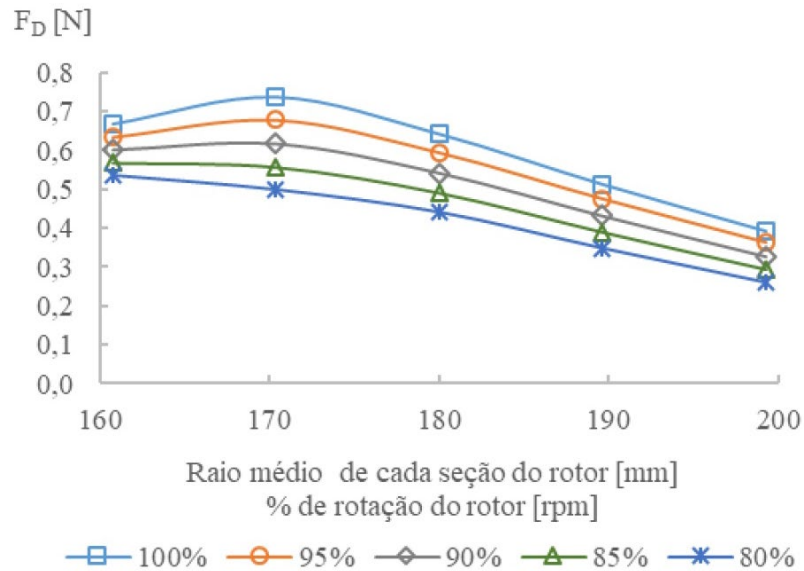


Figura 19 - Variação de F_D em função do raio médio de cada seção e variação da rotação (SERRANO, 2017)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Ensaios de Abrasão e Análise das Calotas

As leituras feitas em MEV dos 18 ensaios mostraram calotas bem definidas que caracterizam que o regime permanente de desgaste foi alcançado (COZZA, 2011). As imagens obtidas são com ampliações de 50x, 500x e 1000x (Figura 20). Nas imagens de 50x já é possível medir com grande exatidão o diâmetro das calotas de desgaste, enquanto nas imagens de 500x e 1000x é possível identificar o mecanismo de desgaste. A fim de obter detalhes, foi gerada também uma imagem de 5000x.

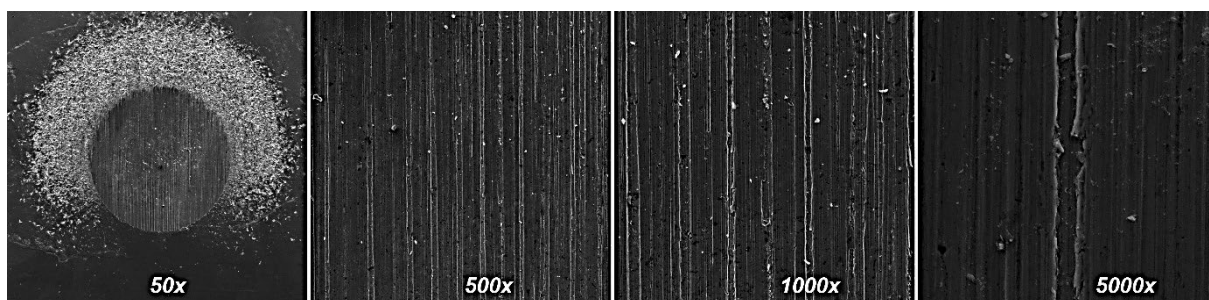


Figura 20 - Ampliações utilizadas nas análises no MEV (AUTOR, 2019)

Como esperado, o diâmetro das calotas cresce de acordo com o aumento da concentração de sedimentos, devido ao maior número de grãos entrarem em contato com a esfera e a calota de desgaste. Na Tabela 5 e no gráfico da Figura 21 é evidenciado esse aumento:

Tabela 5 – Diâmetro médio das calotas (AUTOR, 2019)

Abrasivo	Concentração (g/l)	$\bar{\varnothing}_m$ [μm]	$\bar{\varnothing}_m$ [m]	Desvio Padrão [μm]
Carbeto de silício	10	970,30	0,00097	8,0
Sedimento	10	1255,75	0,00126	94,5
	5	1150,85	0,00115	33,9
	3	1086,88	0,00109	31,2
	2	960,67	0,00096	5,6
	1	920,98	0,00092	14,0

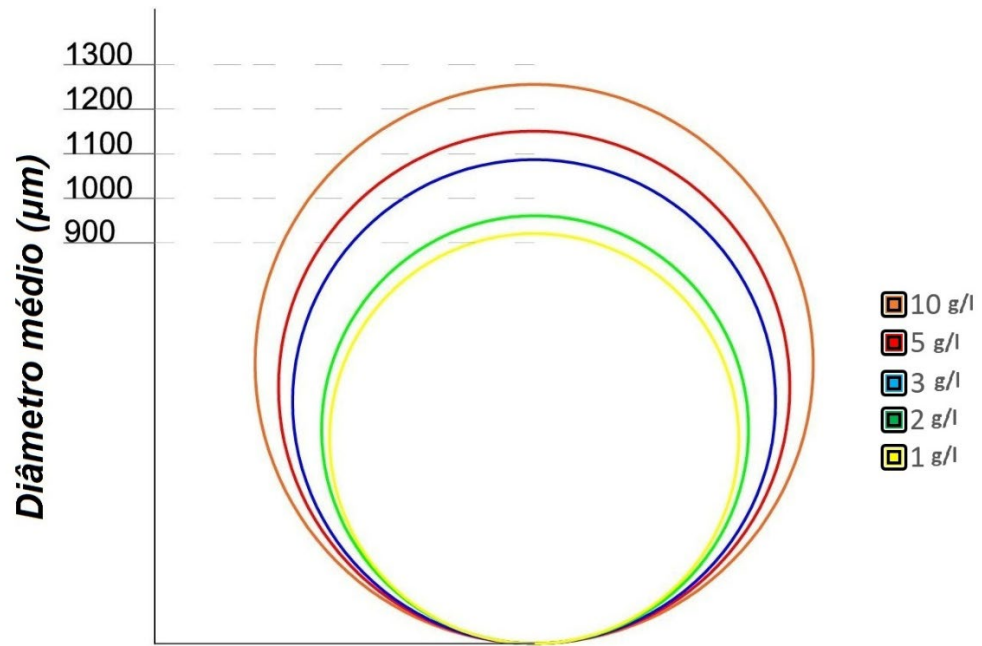


Figura 21 – Sobreposição dos diâmetros médios das calotas de desgaste para cada concentração de sedimento (AUTOR, 2019)

A Figura 22 mostra uma calota de desgaste para cada concentração de abrasivo, sendo possível observar a boa formação das calotas e como o diâmetro cresce de acordo com a concentração.

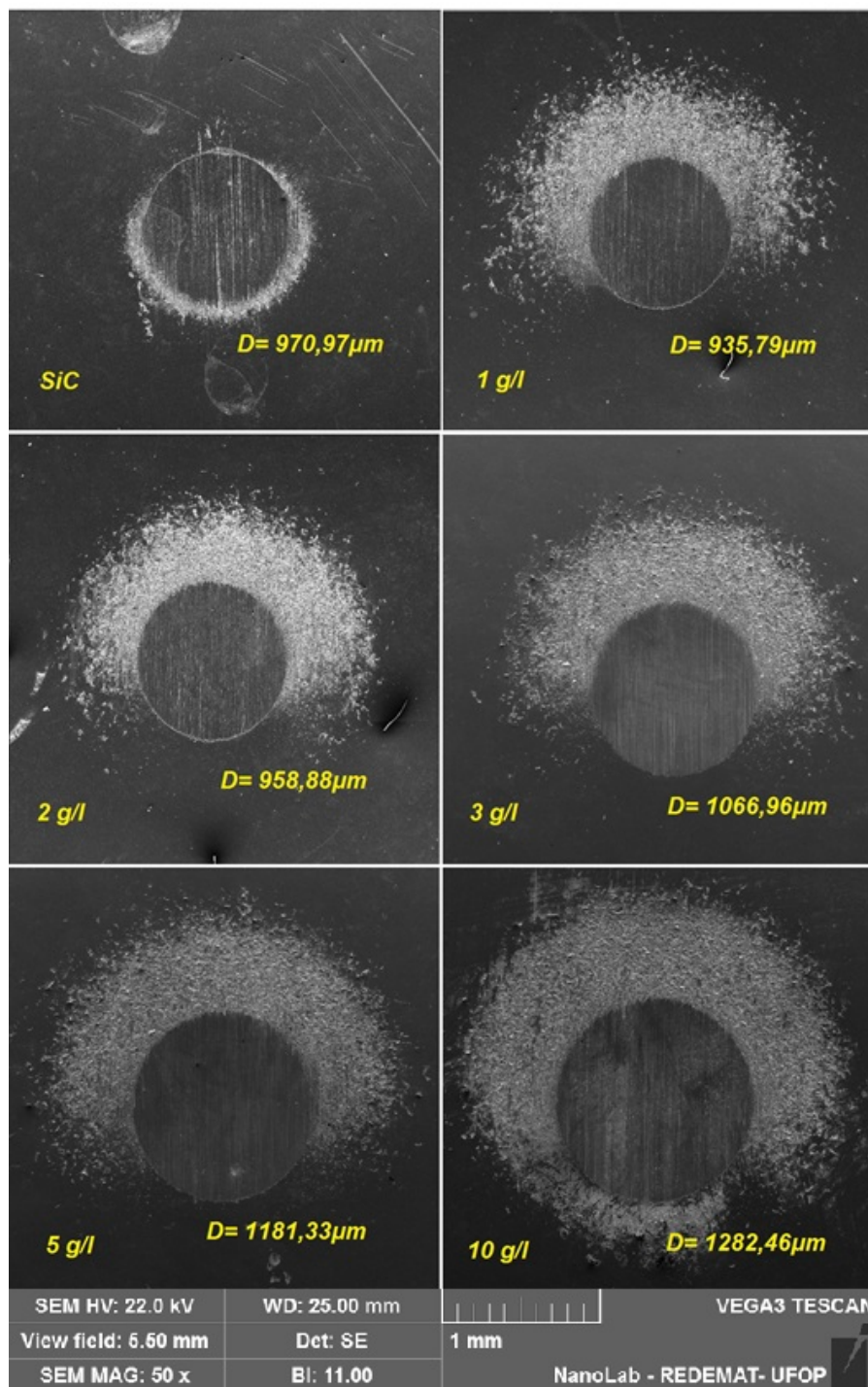


Figura 22 – Calotas de desgaste de acordo com a concentração de abrasivo (AUTOR, 2019)

4.1.1 Determinação do Desgaste em Função da Concentração de Sedimentos

Como exposto no gráfico da Figura 21, o diâmetro médio das calotas cresce quando se aumenta a concentração de sedimentos. Com isso é possível prever de

acordo com a Equação 1, que o volume do desgaste é dependente do diâmetro e de acordo com as Equações 2 e 3, quanto maior o volume de desgaste maior será a taxa de desgaste e o coeficiente de desgaste. O gráfico da Figura 23 mostra o crescimento da taxa de desgaste em função da concentração de abrasivo sedimento e também a taxa de desgaste calculada para o abrasivo SiC.

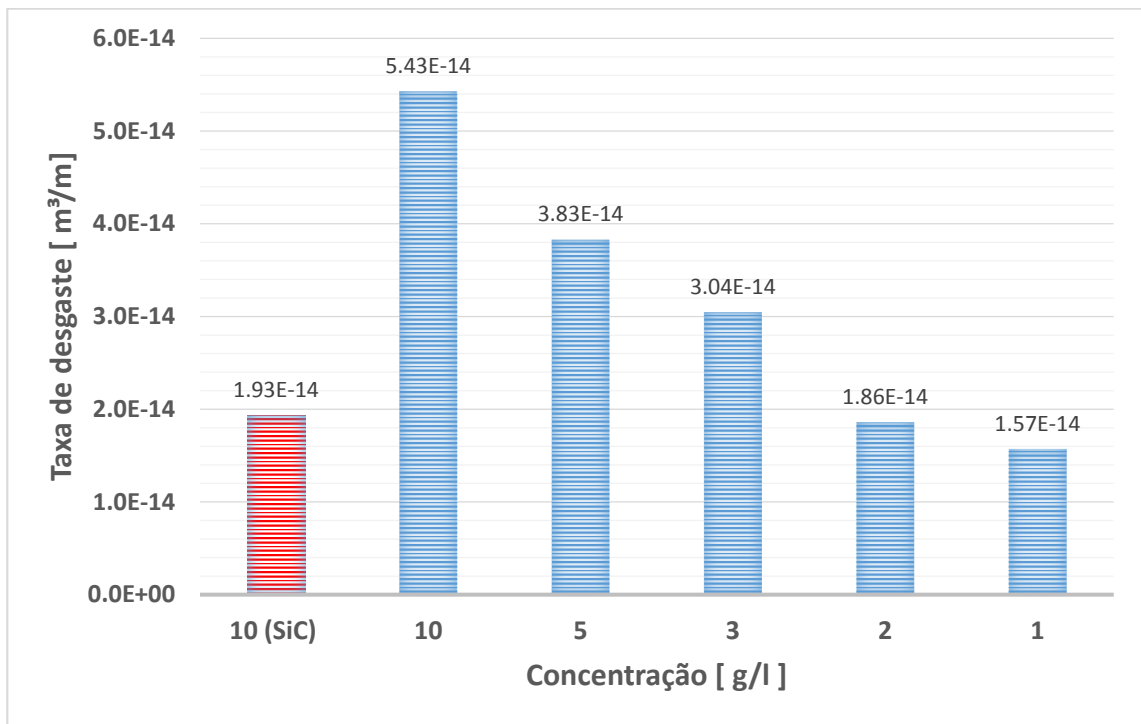


Figura 23 – Taxa de desgaste em função da concentração de abrasivo (AUTOR, 2019)

O comportamento do coeficiente de desgaste (K) fica bem ajustado em uma curva logarítmica. No gráfico da Figura 24 fica evidente o aumento de K de acordo com a concentração:

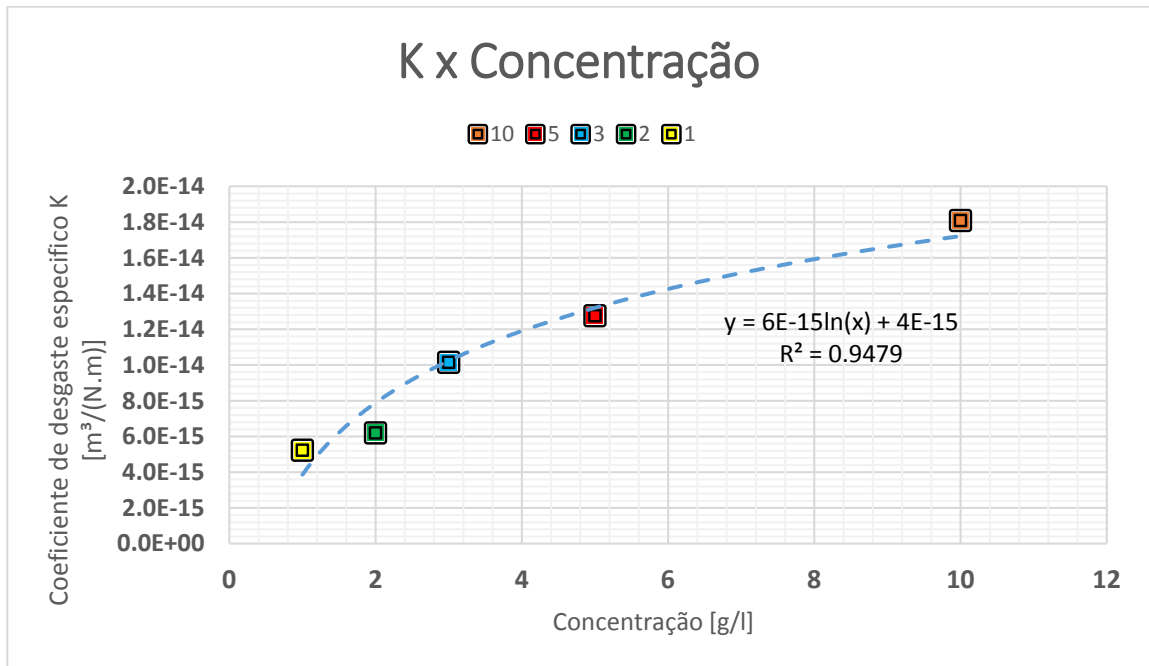


Figura 24 – Coeficiente de desgaste específico (K) em função da concentração de sedimento (AUTOR, 2019)

A partir da curva de ajuste dos pontos do gráfico, é possível perceber o crescimento do coeficiente de desgaste com a concentração de abrasivo. Também é possível observar que a taxa de crescimento em função do aumento da concentração de sedimentos não é diretamente proporcional, assim como observado nos trabalhos de Serrano *et al.* (2018a e 2018b). Essa tendência também foi observada por Trezona *et al.* (1999), onde a taxa de aumento do desgaste foi sendo reduzida até a concentração de 18% de material abrasivo. Quanto a forma de desgaste, passa de riscamento para rolamento, quando o aumento da concentração de abrasivo tende a uma diminuição do desgaste e conseqüente queda do coeficiente de desgaste.

4.1.2 Comparação da Abrasividade do Sedimento e do Abrasivo de Referência

A comparação do desgaste produzido pelo sedimento do Rio Acre e pelo abrasivo de referência, Carbetto de Silício, foi feita a partir dos ensaios produzidos com a concentração de 10 g/l de sedimento e os ensaios de 10 g/l de carbetto de silício. A Figura 25 mostra o resultado de um dos ensaios realizados para cada abrasivo.

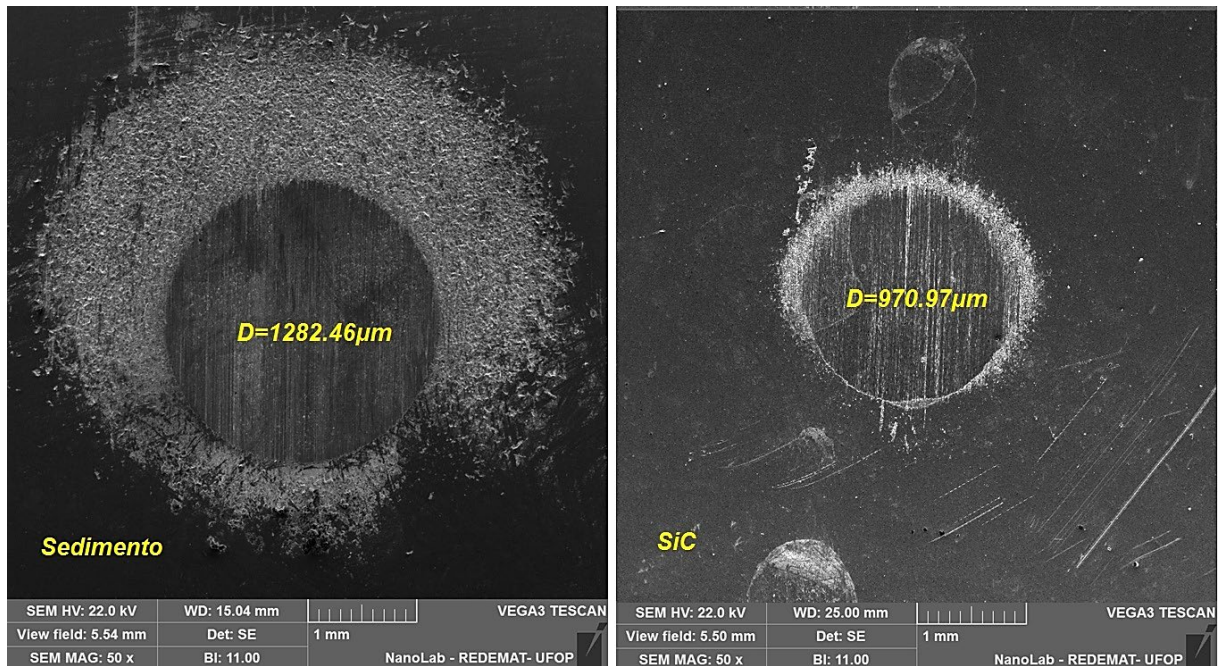


Figura 25 – Calotas de desgaste para os abrasivos sedimento e carbeto de silício (AUTOR,2019)

A partir da Figura 23 e da Figura 26, que evidenciam a diferença do volume e da taxa de desgaste provocados pelos dois abrasivos, percebe-se que o sedimento é em média 280% mais abrasivo que o carbeto de silício. Isto se explica pela heterogeneidade e tamanho maior das partículas do sedimento, assim como a grande presença de grãos de quartzo de grande dureza. De acordo com Cozza (2011), “ as maiores partículas abrasivas conduzem a maiores coeficientes de desgaste” e que partículas com maior fator de circularidade conduzem a valores menores de K, pelo qual pode-se concluir que quanto mais irregulares e angulosas forem as partículas, maiores serão os valores de K (não podendo excluir o fator dureza da partícula abrasiva).

Em posse desse valor é possível comparar a abrasividade desse sedimento com sedimentos de outras bacias ou até mesmo outros materiais abrasivos, uma vez que o carbeto de silício é utilizado como abrasivo de referência na grande maioria de ensaios com abrasômetro de esfera rotativa.

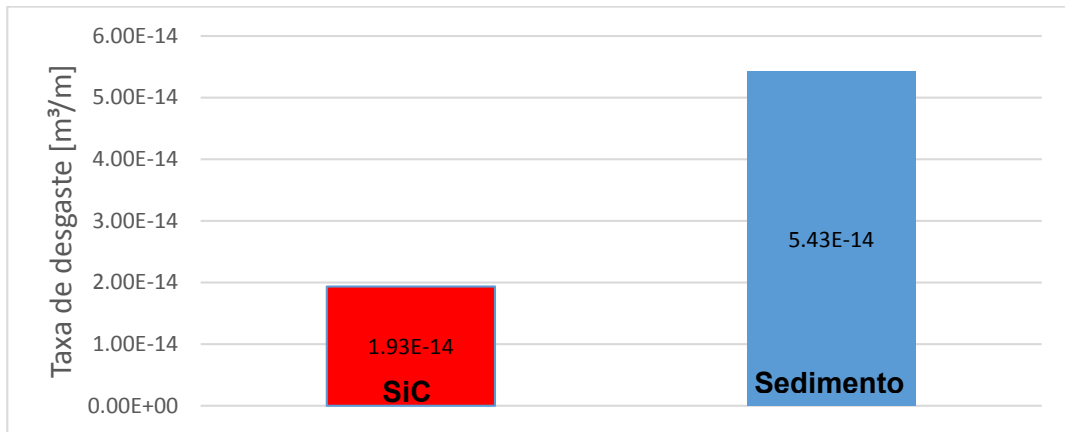


Figura 26 - Taxa de desgaste em função do abrasivo (AUTOR,2019)

4.2 Caracterização do Mecanismo de Desgaste Abrasivo

Em todas as calotas produzidas com o sedimento e carbeto de silício, o mecanismo de desgaste foi o mesmo. O mecanismo de desgaste predominante em todas é o desgaste abrasivo por riscamento, que ocorre quando as partículas abrasivas aderem na esfera, sendo possível a elas apenas o movimento de translação em relação à amostra ensaiada (COZZA, 2011). O mecanismo de desgaste é definido de acordo com a força normal e concentração de sedimentos. A força normal de 3N é relativamente alta e as concentrações de abrasivo são relativamente baixas, favorecendo o mecanismo de desgaste por riscamento, segundo estudos de Cozza (2011). O desgaste abrasivo por riscamento apresenta padrão visível e bem definido como é possível ver na Figura 27.

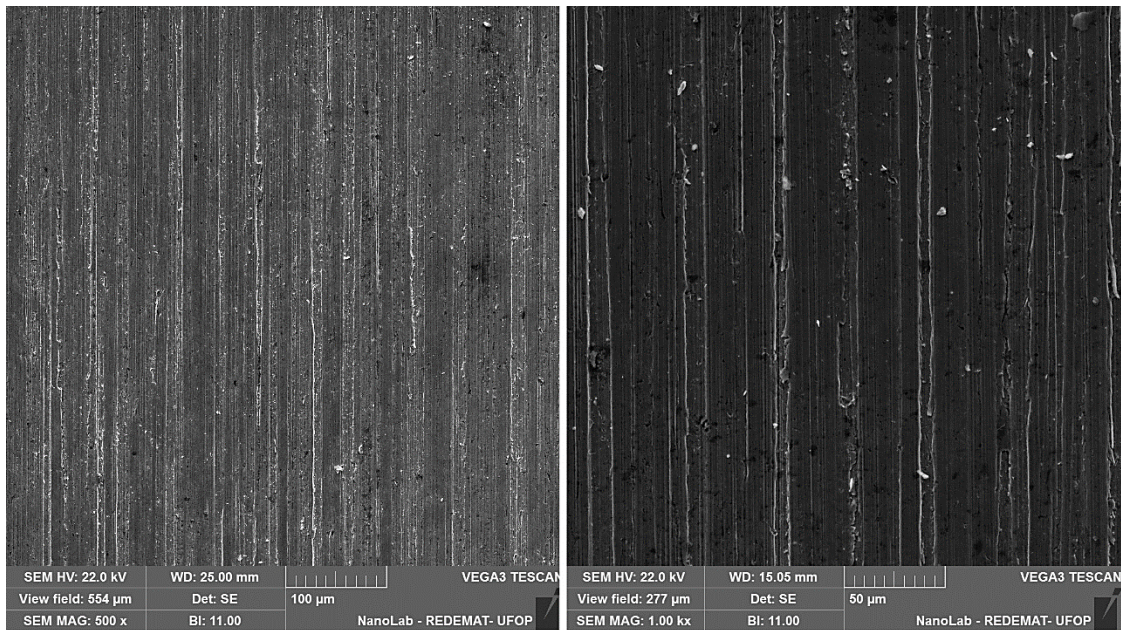


Figura 27 – Desgaste abrasivo por riscamento (AUTOR, 2019)

A partir das imagens do MEV com ampliação de 1000x, já é possível detectar os mecanismos de desgaste provocados pelas partículas abrasivas. Fica evidente e predominante o microsulcamento, microfadiga e arrancamento, não sendo encontradas trincas. Microsulcamento e microcortes são dominantes em materiais mais dúcteis (MÁSCIA, 2002), favorecidos pelas deformações plásticas encontradas nesses mecanismos. Na Figura 28 é possível observar regiões (A) onde ocorre o arrancamento. Nessa mesma figura, pode-se observar o processo de microsulcamento (B) em que ocorre a deformação plástica com acúmulo de material bordas dos sulcos. Em todos os ensaios ocorreu o desprendimento de microfragmentos de desgaste, devido a fadiga pelo número de ciclos sucessivos.

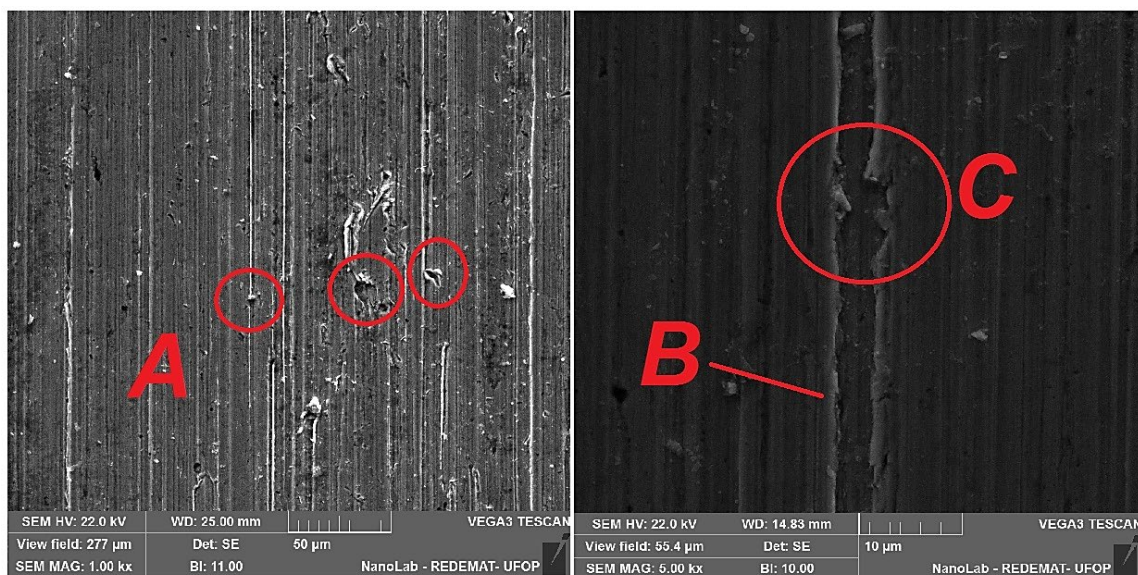


Figura 28 – Detalhe da formação de arrancamento (A), de microsulcamento (B) e microfadigas (C)
(AUTOR, 2019)

4.3 Estimativa do Desgaste do Rotor

Considerando as velocidades relativas na entrada e na saída do rotor (Tabela 3), a variação de arrasto sobre as pás (Tabela 4) e a variação do K em função da carga de sedimento (Figura 24), aplicou-se a Equação 5 para estimar o volume de desgaste da pá em função da variação da carga de sedimento e da cota média mensal do Rio Acre (Figura 29). É possível observar que a não aplicação do controle rotacional da máquina, aproveitando a redução da altura de elevação 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.

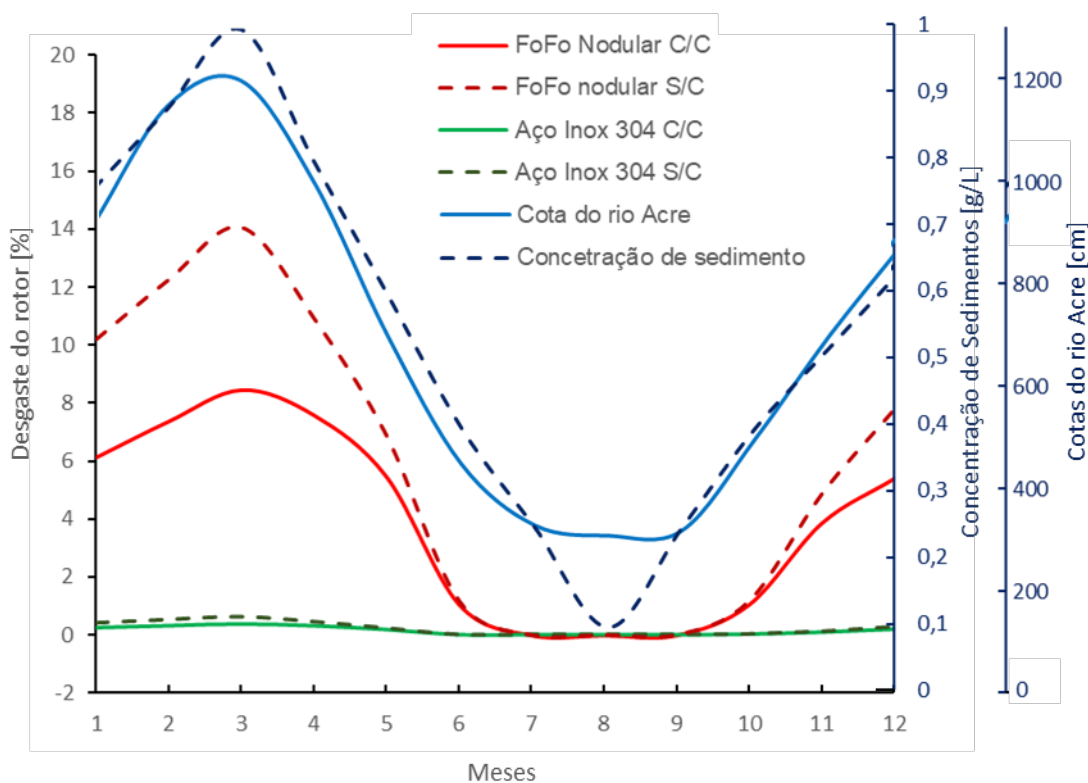


Figura 29 - Desgaste das pás do rotor em função da variação da carga de sedimentos do Rio Acre (AUTOR, 2019)

No caso apresentado, ao aplicar o controle rotacional, a velocidade relativa do fluido diminuiu, reduzindo a força de arrasto abrasivo sobre as pás do rotor e também o desgaste, como pode ser observado no período de outubro de um ano ao mês de maio do ano seguinte (Figura 29), assim como sugerido por Serrano *et al.* (2018b).

Ao observar o desgaste acumulado no gráfico da Figura 30 e considerando o limite de desgaste em 50% da espessura das pás do rotor, pode-se concluir que com o controle rotacional, o rotor em FoFo Nodular poderia rodar por 1 ano, pois apresenta um desgaste acumulado de aproximadamente 47% quando aplicado controle rotacional e 70% quando não aplicado o controle rotacional, enquanto que o rotor em aço AISI 304 poderia rodar por cerca de 28 anos antes de atingir o desgaste acumulado de 50%. Para um ano hidrológico este apresenta desgaste acumulado de 1,73% quando aplicado controle rotacional e 2,64% quando não aplicado o controle rotacional. Sem o controle rotacional o desgaste do rotor poder ser até 35% mais acelerado, para ambos os materiais.

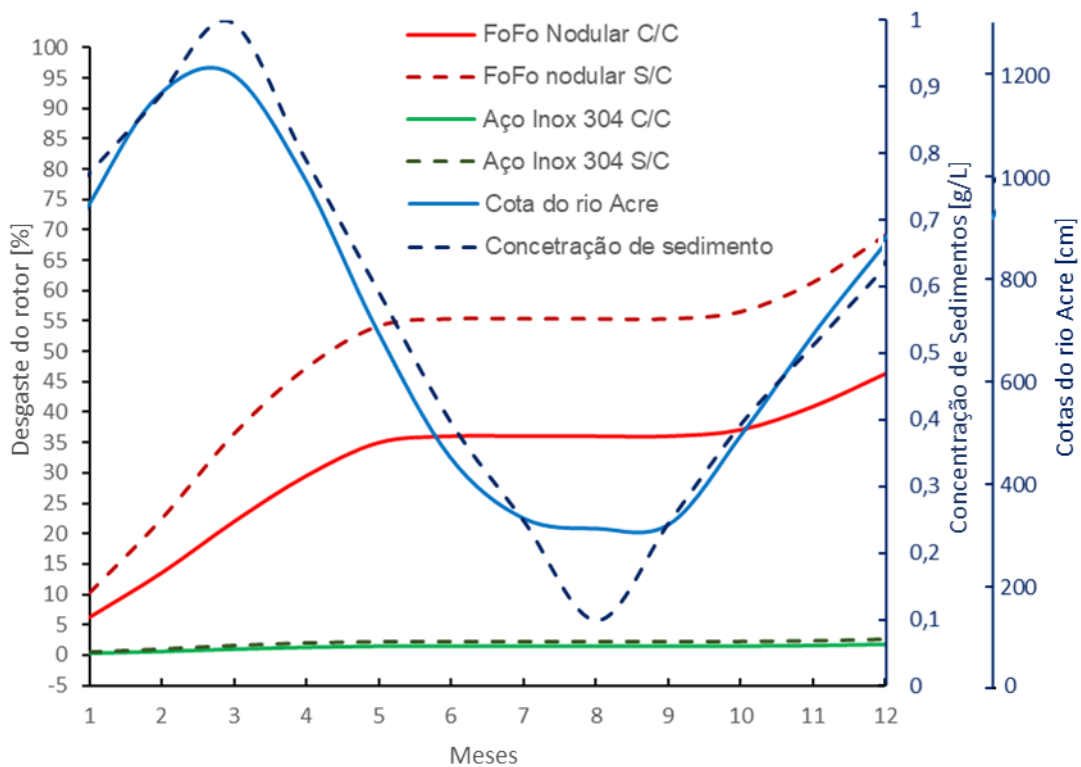


Figura 30 - Desgaste acumulado das pás do rotor em função da concentração de sedimentos do Rio Acre (AUTOR, 2019)

Observando novamente o gráfico da Figura 29, verifica-se a maior resistência do aço AISI 304, sendo 26 vezes mais resistente que o FoFo Nodular, mostrando forte correlação do coeficiente de desgaste com a dureza do material analisado (TIAN *et al.*, 2005; SERRANO *et al.*, 2018a e 2018b).

Vale salientar, que esta estimativa de desgaste foi para o rotor de projeto com pás de 6mm de espessura (Tabela 2). Levando-se em consideração que as amostras de FoFo Nodular foram retiradas de um rotor Flygt com pás de 15mm e que esses rotores apresentam vida útil de 2 anos na EEAB (SERRANO *et al.*, 2016), os resultados apresentados pela estimativa de desgaste (Figura 29 e Figura 30) mostram-se coerentes, tendo em vista que as pás do rotor de projeto têm apenas a metade da espessura do rotor real.

5 CONCLUSÃO

Os resultados e discussões trazem as conclusões apresentadas nos parágrafos a seguir.

A consistência e reprodutibilidade dos resultados com as condições e metodologia aplicada nos ensaios mostraram que os ensaios de microabrasão por esfera rotativa foram adequados para investigar a capacidade abrasiva dos sedimentos e o desgaste abrasivo no aço inoxidável AISI 304.

A boa formação das calotas apontam para um regime permanente de desgaste, comprovado com calotas de diâmetros bem próximos e bordas bem definidas para as variadas concentrações ensaiadas. A ampliação das calotas de desgaste por microscopia evidencia o mecanismo de desgaste por riscamento, dominante para todas as concentrações e para ambos os abrasivos, motivado pela elevada dureza das partículas do sedimento que é suficientemente grande a ponto causar danos em rotores mesmo a baixas concentrações.

A análise comparativa dos resultados para o abrasivo sedimento e o abrasivo carbetto de silício evidencia que a abrasividade do sedimento é em torno de 280% maior que a abrasividade do carbetto de silício. O carbetto de silício utilizado, que apesar de ter alta dureza, apresenta partículas até 6 vezes menores que as partículas do sedimento, fator que influencia na maior abrasividade do sedimento. Com essa relação torna-se possível comparar diretamente a abrasividade do sedimento do Rio Acre com sedimentos de outras bacias, tornando este estudo extensível a outras EEAB de outras áreas.

A capacidade abrasiva dos sedimentos do Rio Acre mostrou-se evidente na formação das calotas de desgaste no aço AISI 304, sendo um desgaste menos intenso do que no aço FoFo Nodular. Como a base da resistência do material ao desgaste decorre da sua dureza, os resultados são condizentes por conta da dureza do AISI 304 ($BH \sim 180 \text{kgf/mm}^2$) ser maior que a dureza do FoFo Nodular ($BH \sim 140 \text{kgf/mm}^2$).

A consideração do controle rotacional em função da variação da cota do rio, e consequente variação da altura manométrica, mostrou sua importância ao possibilitar a redução do desgaste do rotor de ambos os materiais em até 35% em um ciclo hidrológico. A alteração da rotação da bomba, mantendo-se o mesmo volume de adução de água, é uma solução eficiente para aumentar a vida útil dos rotores, independente do material. Aconselha-se esse controle em EEAB em localidades que apresentem variação da cota fluviométrica e da carga de sedimentos.

O desgaste acumulado no rotor de FoFo Nodular é 26 a 28 vezes maior que o desgaste acumulado no rotor em aço AISI 304, por isso o aço AISI 304 seria a melhor escolha de liga para compor rotores da EEAB da ETA II. Com as condições de trabalho da ETA II, um rotor de aço AISI 304 com as características analisadas poderia durar cerca de 26 anos até que atinja o desgaste limite acumulado de 50%, sendo excluída a ocorrência de outros tipos de desgaste que geralmente ocorrerem nesses sistemas, como por exemplo, erosão por cavitação ou por choque de partículas sólidas.

Com isso recomenda-se o uso de rotores em aço AISI 304 para EEAB que tenham captação em corpos d'água com grande variação da carga de sedimentos, por ser 26 vezes mais resistente ao desgaste abrasivo que o FoFo Nodular. Aconselha-se também a análise econômica na diminuição do regime de troca dos rotores, frente a redução do rendimento das bombas em grandes períodos. Visto que um rotor que resiste a longos períodos de tempo, conseqüentemente também irá rodar por grande tempo com desgastes relevantes, porém ainda menores que o desgaste crítico para a troca.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

- Análise econômica para redução do desgaste crítico para troca, considerando rotores muito resistentes ao desgaste abrasivo.
- Avaliar o comportamento dos dois materiais considerando a ação corrosiva associada às suspensões abrasivas de sedimento e SiC.

REFERÊNCIAS

APERAM, South America, **Aços Inoxidáveis: aplicações e especificações, 2015**. Disponível em <https://www.abinox.org.br/>, acessado em Fevereiro de 2019.

ALBANEZE, D. B. **Análise do Consumo de Energia Elétrica com a Instalação de Um Inversor de Frequência no Sistema de Abastecimento de Água do Bairro Aero Rancho em Campo Grande – MS**, Trabalho de Conclusão de Curso-Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. 2012.

ALMEIDA, P. L. C.. **Optimização da operação de uma estação elevatória: minimização do custo da energia respeitando critérios de qualidade da água**. 2010.

AQUINO, G. A.. **Caracterização do escoamento de ar em adutoras e válvulas ventosas**. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil - Universidade Estadual de Campinas. 2013

ARTUZO, G. C.. **Determinação do coeficiente de atrito nos ensaios de abrasão por esfera rotativa**. 2014.

BARBOSA, F. A. R.. **Boletim semanal de monitoramento da bacia do Acre XIII**, Sistema de Alerta Hidrológico da Bacia do Rio Acre. 2016

BRUNATTO, S. F.. **INTRODUÇÃO AO ESTUDO DOS AÇOS** –2016

CARBÓ, H. M., **Apostila Aço Inoxidável – Aplicações e Especificação**. Núcleo Inox, Acesita, 2001.

CARVALHO, D. F. **Instalações elevatórias - Bombas**. FUMARC-Fundação Mariana Resende Costa. 5ª Edição. Belo Horizonte, 1992

CASTRO, A. L. P.. **Estudo da abrasividade da concha de (*Limnoperna fortunei*) com enfoque no labirinto superior em turbinas hidráulicas**. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais. 2018

COSTA, R. S.. **Estudo da corrosão do aço inox AISI 304 em álcool etílico hidratado combustível**. 2012.

COZZA, R. C.. **Estudo do comportamento do coeficiente de desgaste e dos modos de desgaste abrasivo em ensaios de desgaste micro-abrasivo**. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica. Universidade de São Paulo. 2006.

COZZA, R. C.; SOUZA, R. M.. **Estudo do desgaste e atrito em ensaios micro-abrasivos por esfera rotativa fixa em condições de força normal constante e pressão constante**. 2011.

CPRM, Serviço Geológico do Brasil. Disponível em <https://www.cprm.gov.br/sace/acre_caracteristicas.php> acessado em junho de 2019

DUARTE, Al. F.; GIODA, A.. **Inorganic composition of suspended sediments in the Acre River, Amazon Basin, Brazil**. Latin American journal of sedimentology and basin analysis, v. 21, 2014.

FERREIRA, F. M.. **Avaliação tribomecânica via esclerometria retilínea e indentação instrumentada do aço abnt 8550**. 2010.

FRACASSO, P. T.. **Redução de gastos com energia elétrica em sistemas de distribuição de água utilizando processos decisórios de Markov**. Tese de Doutorado em Ciências. Universidade de São Paulo. 2014.

GEE, M., Gant, A., Hutchings, I., Bethke, R., Schiffman, K., Van Acker, K., Von Stebut, J.. **Progress towards standardisation of ball cratering**. Wear, v. 255, n. 1-6, p. 1-13, 2003.

GOMES, H. P.. **Eficiência Hidráulica e Energética em Saneamento – Análise Econômica de Projetos**. UFPB, João Pessoa. 2009

HidroWeb, Agência Nacional de Águas (ANA). Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br/>> acessado em Fevereiro de 2019

HOKKIRIGAWA, K.; KATO, K. Revista Tribology International V.21, 51 –57, 1988.

HUTCHINGS, I. M.. **Tribology – Friction and wear of engineering materials**. London. 1992

INEE, **A Eficiência Energética e um Novo Modelo para o Setor Energético, 2001**; disponível em: <http://www.inee.org.br/down_loads/escos/EE_Novo%20Modelo.pdf > acessado em fevereiro de 2019

KELLERHALD, R.; CHURCH, M.; BRAY, D. **Classification and analysis of river processes**. American society of Civil Engineers Proceeding. Journal of the Hydraulics Division, p. 813-829, 1976.

LATUF, M. O.; AMARAL, E. F.. **Estimativa da curva de descarga sólida em suspensão do Rio Acre**. Congresso Internacional de Hidrossedimentologia. 2015

MÁSCIA, R.. **Desenvolvimento e Caracterização Tribológica de Materiais Resistentes ao Desgaste Abrasivo para Indústria Mineradora**. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia. 2002

MASSARO, G. A.. **Comparação das características de desempenho de um rotor fechado de fluxo radial, aplicado em bomba centrífuga, produzido via fundição convencional e fundição de precisão (investment casting)**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica. 2017.

OSWALDO, B. J.. **Determinação de índices de desempenho energético em estações elevatórias de água.** Tese Doutorado em Engenharia Civil – Universidade Estadual de Campinas. 2017

PASCOALI, S., SANTANA, F. E., SANTOS, J. L., VIEIRA J. E.. **Aprendizagem significativa no ensino de engenharia: Utilizando mapas conceituais para compreender mecanismos e ensaios de desgaste.** XXXIX Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, COBENGE, 2011

PEDROSA, H. T. S.. **Otimização em estação elevatória em sistemas de abastecimento de água buscando a eficiência energética.** Universidade Federal de Pernambuco. 2015

PROCEL SANEAR 2008, , disponível em

<www.procelinfo.com.br/resultadosprocel2008/docs/Procel_rel_2008_web.pdf> acessado em março de 2019

ReCESA - Rede Nacional de Capacitação e Extensão Tecnológica em Saneamento Ambiental. Acessado em março de 2019, disponível em www.mp.go.gov.br/portalweb/hp/9/docs

RIGHETTO, A. M.. **Hidrologia e recursos hídricos.** 1998.

ROHDE, R. A.. **Metalografia preparação de amostras.** Laboratório de ensaios mecânicos. Universidade Regional Integrada do alto Uruguai e Missões, 3ª Edição, Rio Grande do Sul, 2010.

ROWE, G., “**Friction, wear and lubrication terms and definitions**”. Paris. 1966

RUTHERFORD, K.; HUTCHINGS, I., **Theory and Application of a Micro-Scale Abrasive Wear Test**, *Journal of Testing and Evaluation* 25, no. 2 (1997): 250-260.

SANCHEZ-ORTIZ, William, ANDRADE-GÓMEZ, C., HERNANDEZ-MARTINEZ, E., & PUEBLA, H. **Multifractal Hurst analysis for identification of corrosion type in AISI 304 stainless steel.** *International Journal of Electrochemical Science*, v. 10, 2015.

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

SERRANO, R. O. P.. **Metodologia para avaliação de desgaste abrasivo em pás de rotor de bombas centrifugas de estação elevatória.** Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte-MG, Brasil. 2017

SERRANO, R. O. P., DE CASTRO, A. L. P., RICO, E. A., PINTO, M. A., VIANA, E. M. D. F., & MARTINEZ, C. B.. **Abrasive effects of sediments on impellers of pumps used for catching raw water.** AGRIAMB. 2018a

SERRANO, R. O. P., SANTOS, L. P., VIANA, E. M. F., PINTO, M. A., & MARTINEZ, C. B.. **Case study: Effects of sediment concentration on the wear of fluvial water pump impellers on Brazil's Acre River.** ELSEVIER. 2018b

SWANSON, P. A.; VETTER, A. F.; **The Measurement of Abrasive Particle Shape and its Effect on Wear.** ASLE Transactions, V28, 1985

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. 2005.

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, p. 205-214, 1999.

TRIDAPALLI, C. W.. **Estudo comparativo de metodologias de ensaios acelerados de corrosão por frestas nas ligas de aço inox AISI 430 e AISI 304.** 2012.

TSUTIYA, M. T.. **Abastecimento de água.** Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo 3ª Edição, 2006.

YANG, C. X.; DONG, F. D.; CHENG, X. R. **Numerical investigation of sediment erosion to the impeller in a double-suction centrifugal pump.** In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2013.

ZEFERINO, R. R. D. F., COZZA, R. C., SOUZA, R. M. D., & TANAKA, D. K. **Análise de ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa conduzidos sob força normal e pressão de contato constantes.** CREEM. 2007.

ZUM GAHR, K.: **Microstructure and Wear of Materials.** Amsterdam: Elsevier, 1987