

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COECI – COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

FERNANDO NUNES CAVALHEIRO

**METODOLOGIA PARA INVESTIGAÇÃO DE COLMATAÇÃO DE
FILTROS DE BARRAGEM DE TERRA – ESTUDO PILOTO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TOLEDO

2018

FERNANDO NUNES CAVALHEIRO

**METODOLOGIA PARA INVESTIGAÇÃO DE COLMATAÇÃO DE
FILTROS DE BARRAGEM DE TERRA – ESTUDO PILOTO**

Trabalho de Conclusão de Curso II
apresentado como requisito parcial à
obtenção do título de Bacharel, do curso de
Engenharia Civil, da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná.

Orientadora. Prof.^a Dra. Priscila Vaz de Arruda

Co-orientadora: Prof.^a M.^a Patricia Casarotto
de Oliveira

TOLEDO

2018



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Toledo
Coordenação do Curso de Engenharia Civil



TERMO DE APROVAÇÃO

Título do Trabalho de Conclusão de Curso de Nº 126

Metodologia para investigação de colmatção de filtros de barragem de terra – ESTUDO PILOTO

por

Fernando Nunes Cavalheiro

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 15h50min do dia **07 de Junho de 2018** como requisito parcial para a obtenção do título **Bacharel em Engenharia Civil**. Após deliberação da Banca Examinadora, composta pelos professores abaixo assinados, o trabalho foi considerado **APROVADO**.

Dra. Jussara Elias de Souza
(ITAIPU-BINACIONAL)

Prof. Dr. Maurício do Espírito
Santo Andrade
(UTFPR – TD)

Prof.^a Dra. Priscila Vaz Arruda
(UTFPR – TD)
Orientadora

Visto da Coordenação
Prof. Dr. Fúlvio Natércio Feiber
Coordenador da COECI

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.

RESUMO

Cavalheiro, Fernando N. **Metodologia para investigação de colmatção de filtros de barragem de terra – estudo piloto**. 2018, 70 pág. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Civil – Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. Toledo-PR, 2018.

Estudos sobre a colmatção de filtros de barragens de terra tiveram forte expressão no Brasil nas últimas décadas. A obstrução dos sistemas drenantes dos barramentos pode ocorrer por agentes físicos, químicos ou biológicos; devido a compostos obstrutores como óxidos, hidróxidos ou até mesmo micropartículas de argilas carregados pelas águas de drenagem. O acúmulo desses compostos estáveis, que evoluem ao longo do tempo, tende a preencher os vazios dos filtros e drenos diminuindo sua permeabilidade, alterando suas características originais e podendo levar ao aumento das subpressões na barragem. Nesse sentido, o objetivo desse trabalho foi iniciar o desenvolvimento de um protótipo para monitorar parâmetros indicativos de colmatção física e biológica de filtros de areia artificial. O sistema consiste em colunas de carga constante adaptadas para reaproveitamento de água, com fluxo constante e automatizado. A areia artificial constitui-se de basalto britado, pela maior disponibilidade de ferro no sistema, bem como pela sua aplicação em filtros de barragens regionais. A água do sistema foi coletada no Rio São Francisco situado na cidade de Toledo-PR para avaliar possíveis processos colmatativos. Sobre os parâmetros de monitoramentos, foram analisados para esse estudo pH, condutividade elétrica, turbidez, temperatura sólidos totais, contagem de unidades formadoras de colônias (UFC). Os resultados obtidos permitiram constatar uma variação das condições físico-químico entre as colunas de colmatção elaboradas, e o desenvolvimento microbiológico, durante o período de análise.

Palavras-Chave: Colmatção, Filtro granular, Areia artificial, Estudo preliminar,

ABSTRACT

Cavalheiro, Fernando N. **Methodology for investigating the clogging of earth dam filters – pilot study**. 2018, 70 pág. Graduation Course in Civil Engineering - Federal Technological University of Paraná - UTFPR. Toledo-PR, 2018.

Studies on the clogging of filters of earth dams have had strong expression in Brazil in the last decades. The obstruction of the drainage systems can occur by physical, chemical or biological agents; due to obstructing compounds such as oxides, hydroxides or even microparticles of clays carried by the drainage water. The accumulation of these stable compounds, which evolve over time, tends to fill the voids of the filters and drains, reducing their permeability, altering their original characteristics and leading to the increase of the subpressions in the dam. In this sense, the objective of this work was to start the development of a prototype to monitor indicative parameters of physical and biological clogging of artificial sand filters. The system consists of constant load columns adapted for reuse of water, with constant flow and automated. The artificial sand is constituted of crushed basalt, by the greater availability of iron in the system, as well as by its application in filters of regional dams. The water of the system was collected in the São Francisco River located in the city of Toledo-PR to evaluate possible colmatative processes. On the monitoring parameters, pH, electrical conductivity, turbidity, total solids temperature counting of colony forming units (UFC) were analyzed for this study. The results obtained allowed to observe a variation of the physical-chemical conditions between the columns of elaboration and the microbiological development, during the period of analysis

Key words: Clogging, Granular filter, Artificial sand, Preliminary study

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Sistemas de drenagem interna de barragem com filtro vertical, tapete drenante e dreno de pé	15
Figura 2: Permeâmetro de carga constante	20
Figura 3: Esquema de permeâmetro com carga variável	21
Figura 4: Mecanismos de formação e colmatção, com relação ao tamanho da partícula do soluto.	22
Figura 5: Possibilidade de deposição de partículas nos poros. (a) bloqueio completo dos poros; (b) bloqueio interno ou estreitamento dos poros; (c) bloqueio parcial dos poros; (d) bloqueio por formação de torta.	23
Figura 6: Fluxograma do trabalho.	28
Figura 7: Amostra do material utilizado para estudo	29
Figura 8: Localização e coleta de água.....	30
Figura 9: Recipiente completamente cheio e arrasado	32
Figura 10: Amostra ao atingir a condição saturada superfície seca (sss)	34
Figura 11: Avaliação visual da forma dos grãos, esfericidade e arredondamento. .35	
Figura 12: Sequência do ensaio de índice de vazios mínimo. (a) molde sobre a mesa vibratória; (b) retirada do tubo guia; (c) remoção do excesso de material.	37
Figura 13: Equipamento para o ensaio de permeabilidade	38
Figura 14: Ilustração das camadas do corpo de prova para o ensaio de permeabilidade (espessuras das camadas são ilustrativas).	39
Figura 15: Esquema do ensaio de permeabilidade	40
Figura 16: Sistema de colunas para análise de colmatção de filtros.....	41
Figura 17: Bomba instalada e fixada no equipamento	42
Figura 18: Detalhe da boia para manter o nível do reservatório constante	43

Figura 19: Esquema de cotas para cálculo do gradiente hidráulico	43
Figura 20: Coluna de colmatção, com detalhe para amostra compactada.....	44
Figura 21: Cápsulas em estufa para evaporação (a); Cápsulas em dessecador para atingir a temperatura ambiente (b)	47
Figura 22: Procedimento de montagem da placa de petri (a); placas de petri prontas para a inoculação de microrganismos (b)	49
Figura 23: Procedimento de diluição (a); Semeadura em placa de Petri (b)	50
Figura 24: Curva granulométrica do material utilizado no estudo.....	52
Figura 25: Imagem com a classificação de cada tipo de amostra (a) e (b)	54
Figura 26: Análise de pH nas colunas de colmatção.....	56
Figura 27: Análise de condutividade elétrica nas colunas de colmatção.....	57
Figura 28: Análise de turbidez nas colunas de colmatção	58
Figura 29: Aspecto da água do sistema. (A) Coloração turva de água no momento da coleta. (B) Deposição de sedimento do fundo do reservatório superior, com detalhe para a transparência da água ao final do estudo.....	59
Figura 30: Análise de vazão nas colunas de colmatção.....	60
Figura 31: Variação da temperatura ao decorrer do experimento	60
Figura 32: Contagem média das unidades formadoras de colônias no período de ensaio.....	62
Figura 33: Microrganismos presentes no sistema de estudo	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores típicos de coeficiente de permeabilidade	18
Tabela 2: Composição granulométrica, dimensão máxima característica e módulo de finura	51
Tabela 3: Massa unitária da areia de basalto.....	52
Tabela 4: Massa específica do agregado e massa específica aparente	53
Tabela 5: Índice de forma da areia de basalto	54
Tabela 6: Índice de vazios máximo e mínimo.....	54
Tabela 7: Análise inicial da água utilizada no sistema	56
Tabela 8: Sólidos fixos e totais.....	61

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	JUSTIFICATIVA	12
1.2	OBJETIVOS	13
1.2.1	Objetivo geral	13
1.2.2	Objetivos específicos	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	BARRAGENS DE TERRA	14
2.1.1	Filtros	14
2.2	PERMEABILIDADE DE MACIÇOS COMPACTADOS	17
2.2.1	Conceitos iniciais	17
2.2.2	Determinação do coeficiente de permeabilidade e a lei de Darcy	18
2.3	COLMATAÇÃO DE FILTROS	22
2.3.1	Mecanismo de Colmatação	22
2.3.2	Colmatação em filtros	24
2.4	PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICO E CRESCIMENTO BACTERIOLÓGICO	25
3	MATERIAIS E MÉTODOS	28
3.1	MATERIAIS	29
3.1.1	Material granular	29
3.1.2	Água de percolação	29
3.2	CARACTERIZAÇÃO GEOLOGICA-GEOTÉCNICA DA AMOSTRA	30
3.2.1	Composição granulométrica	31
3.2.2	Massa unitária e do volume de vazios	32
3.2.3	Massa específica e massa específica aparente	33
3.2.4	Determinação do índice de forma	35
3.2.5	Índices de vazios máximo e mínimo	35
3.2.6	Ensaio de permeabilidade	37
3.3	SISTEMA PARA ANÁLISE DE COLMATAÇÃO	41
3.4	ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICA E MICROBIOLÓGICA	45
3.4.1	Condutividade elétrica	45
3.4.2	Potencial Hidrogeniônico (pH)	46
3.4.3	Temperatura	46
3.4.4	Turbidez	46
3.4.5	Sólidos Totais e Sólidos Fixos	47
3.4.6	Análise microbiológica de unidades formadoras de colônias (UFC)	48

4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA.....	51
4.1.1	Granulometria.....	51
4.1.2	Massa unitária, específica e específica aparente	52
4.1.3	Índice de forma.....	53
4.1.4	Índice de vazios máximo e mínimo.....	54
4.1.5	Ensaio de permeabilidade	55
4.2	ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS E MICROBIOLÓGICA	55
4.2.1	Potencial hidrogeniônico (pH), condutividade elétrica, turbidez, temperatura e vazão	56
4.2.2	Sólidos fixos e totais.....	61
4.2.3	Contagem de bactérias e análise microbiológica	61
5	CONCLUSÕES	64
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66

1 INTRODUÇÃO

O filtro de barragem de terra é uma estrutura civil de grande importância para a segurança do aterro, pois é uma forma de interceptar e conduzir de maneira controlada o fluxo da drenagem interna ou da fundação. No entanto, a partir da década de 1960 iniciou-se a divulgação da suscetibilidade do fenômeno de colmatação desses filtros.

As obstruções destes sistemas drenantes podem ocorrer de diferentes formas e mecanismos, sendo que o bloqueio ou estreitamento dos poros podem acontecer por deposição ou precipitação de íons; acúmulo de células, de gases ou de outros processos decorrentes de agentes físicos, químicos e até biológicos.

Com a diminuição da permeabilidade devido à obstrução dos microcanais de percolação, pode-se originar uma alteração às características originais do maciço. Assim, propiciar danos como o aumento de subpressões, reduzindo a estabilidade dos taludes tanto a montante quanto a jusante, podendo desencadear outros fenômenos comprometendo a estrutura do barramento.

Vários estudos de campo e laboratório foram desenvolvidos nessa área do conhecimento, a maioria direcionada para a colmatação de geossintéticos utilizados em filtros. Poucos estudos foram aplicados a filtros granulares, dos quais o foco foi a areia natural. O mecanismo mais estudado é a colmatação físico-biológica, decorrente da ação de bactérias redutoras de ferro, também conhecidas como Ochre.

Dentro desse contexto, o presente trabalho tem por finalidade colaborar com estudos de processos de colmatação de filtros granulares e propiciar uma metodologia para compreensão destas obstruções. O material geotécnico escolhido para o filtro foi a areia de basalto britado, que possui em sua constituição o ferro, também, por ter sido utilizada em um barramento da região do oeste do Paraná.

Por ser um processo reológico e que demanda de bastante tempo de monitoramento, o foco do presente estudo foi a elaboração e a montagem de um sistema assistido, automatizado e com reuso de água. No entanto, foi possível também a identificação do período de equilíbrio químico entre a água de drenagem e o material geotécnico do filtro, que foi de trinta dias. A partir desse tempo as

oscilações dos parâmetros monitorados podem representar ou indicar indícios de colmatação.

1.1 JUSTIFICATIVA

A colmatação é o fenômeno de redução da área transversal dos espaços vazios de um determinado meio poroso e este processo afeta a capacidade drenante ao longo do tempo. Essa ação pode ocasionar a redução da permeabilidade do filtro, alterando as características originais da barragem e provocando um aumento das subpressões com implicações para a segurança de sua estrutura.

Sobre a colmatação geoquímica, seja pela formação de óxidos e hidróxidos de ferro ou pela Fração coloidal de argila (FCA), tem sido observada em diversos aproveitamentos hidrelétricos. Estudos nessa temática tiveram forte expressão nacional nas décadas de 70 e 80. Conforme cita Nogueira Jr (1986) são conhecidos casos como as barragens de Guarapiranga (SP), Rio Grande (MG), Armando de Salles Oliveira (SP), Euclides da Cunha (SP), Caconde (SP), Jaguari (SP), Saracuruna (RJ), Juqueri (SP), e São Simão (MG), entre outras. Internacionalmente, podem-se citar as barragens de Kalé (Nova Guiné), Corin (Austrália), Shek Pik (Hong Kong), Hedi (China) e Zur na Polônia (STERPEJKOWICZ-WERSOCK, 2014).

Com base no exposto, o presente estudo justifica-se ao contribuir com estudos em escala piloto desenvolvidos em laboratório para auxiliar na compreensão desse fenômeno, uma vez que pode ter uma grande relevância para a segurança das barragens de terra. Segundo Cardia e Lage (2017) a colmatação, mesmo sendo um fenômeno constatado e difundido no meio técnico, a origem dos processos ainda não é totalmente conhecida, e a negligência nesse processo pode causar danos a estrutura de uma barragem e até mesmo levá-la a ruína. Neste sentido, a realização de análises laboratoriais, por meio de ambiente controlado, permite a avaliação da influência de parâmetros laboratoriais no processo de colmatação de filtros.

Sabe-se que cada material possui suas particularidades geotécnicas e pode responder de maneira diferente aos agentes que contribuem no processo de colmatação. Nesse sentido, o presente trabalho também se justifica ao propor

análise com material utilizado na região oeste do Paraná em filtros: a areia artificial de basalto britado.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Elaboração de uma metodologia para a investigação de colmatção de filtros compostos de areia artificial de basalto britado, por meio de um sistema automatizado, adaptado do ensaio de permeabilidade de carga constante.

1.2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar parâmetros geológico-geotécnicos da areia artificial utilizada como material de construção de filtro de barragem de terra no presente estudo;
- Montar e monitorar sistema composto por coluna de carga constante para análise de colmatção;
- Analisar comportamento da areia artificial, em termos de suscetibilidade de colmatção;
- Realizar análise microbiológica da água de percolação durante o período de ensaio.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 BARRAGENS DE TERRA

Barragem pode ser considerada uma barreira artificial construída nos cursos de água devido à necessidade de se usufruir dos múltiplos usos da água como irrigação, geração de energia elétrica, navegação, piscicultura, turismo, dentre outros (CBDB, 2011).

Caputo (2013) afirma que as barragens podem ser separadas em dois grandes grupos: as de acumulação e as de derivação. Barragens de acumulação têm por finalidade principal a irrigação, o abastecimento de cidades e a geração de energia elétrica. Enquanto, às de derivação, são as que têm a finalidade de desviar cursos d'água.

Para este trabalho, destaca-se o tipo de barragem para geração de energia, especificamente as barragens de terra, que podem ser do tipo mista ou homogênea (QUINTAS, 2002). As barragens mistas apresentam diferentes tipos de materiais em seu aterro. O núcleo apresenta função de estanqueidade do maciço, por esse motivo estas barragens apresentam núcleos constituídos de materiais com baixa permeabilidade como, por exemplo, concreto asfáltico (ELETROBRAS, 2003). Já as barragens classificadas como homogêneas são quase que por inteiro, constituídas de um único material em seu maciço principal. No entanto, pode haver o uso de outros materiais de construção para elementos como filtros e *rip-rap*¹ (COSTA, 2012).

2.1.1 Filtros

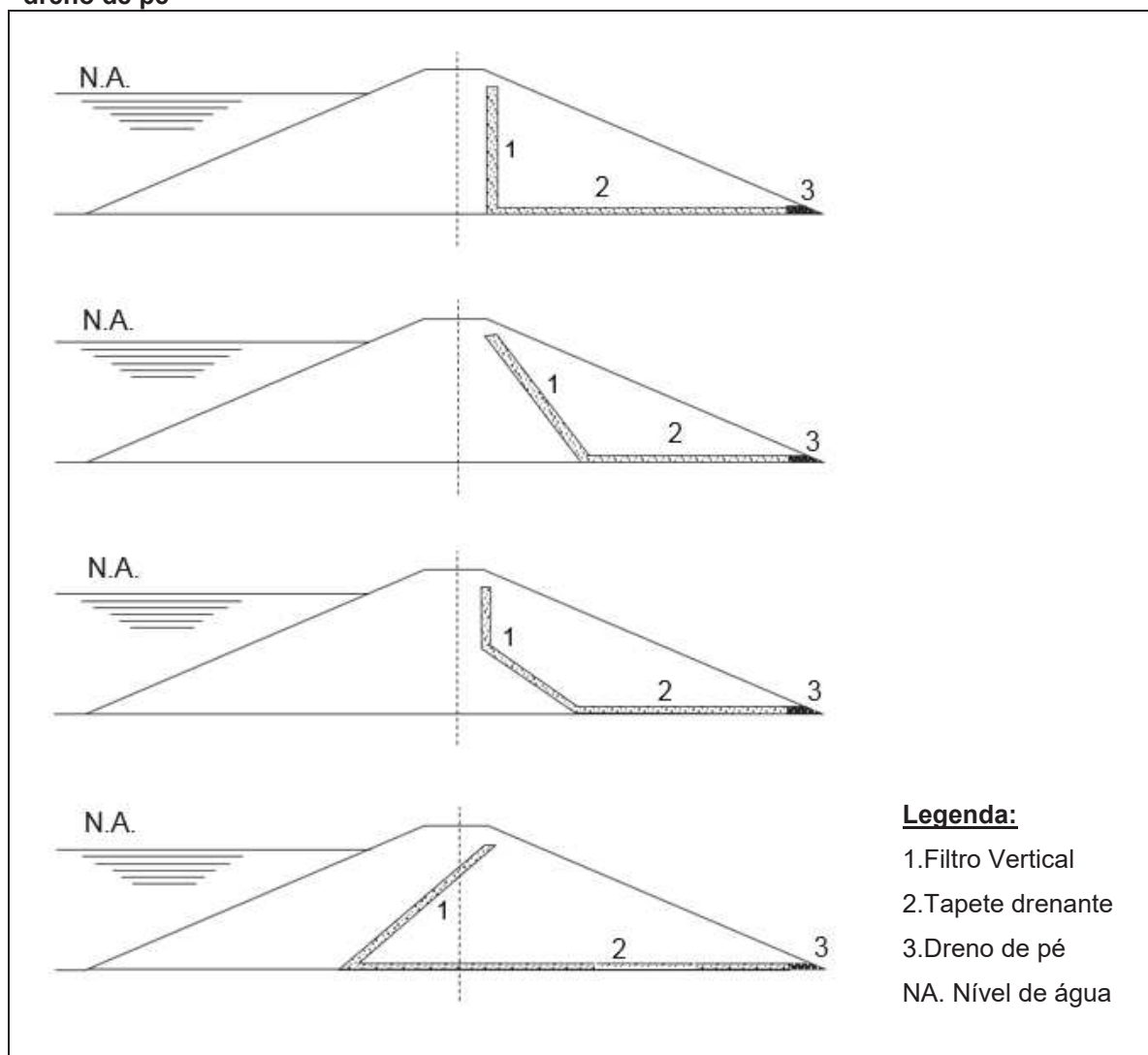
O sistema de drenagem interna de uma barragem é composto por filtros (MARANGON, 2004), os quais possuem função como interceptar e conduzir de

¹ *Rip-rap: Proteção contra a erosão do talude de montante devido as ondas que se formam no reservatório e também da água da chuva advinda da crista (MARANGON, 2004).*

maneira controlada todo e qualquer fluxo de água que possa surgir no interior do maciço da barragem, oriundos de falhas construtivas, trincas durante a vida útil ou até mesmo por processos naturais de cargas hidráulicas (CRUZ, 2014). Nesse sentido, esses dispositivos auxiliam no controle de riscos que possam levar uma barragem à ruína.

Há três tipos de filtros: os verticais, os horizontais e os drenos de pé. Os filtros verticais são posicionados a jusante do eixo da barragem, abaixo da crista, encontrando o tapete drenante (Figura 1). Possuem a vantagem de interceptar as fissurações do maciço e juntar qualquer fluxo que possa percolar pelos poros. Nesse enfoque, a inclinação do filtro também pode variar no interior do maciço auxiliando na eliminação de trincas e colaborando na estabilidade do talude (CRUZ, 2014).

Figura 1: Sistemas de drenagem interna de barragem com filtro vertical, tapete drenante e dreno de pé



Fonte: Adaptada de LIMA, S/D.

Os filtros horizontais são posicionados longitudinalmente ao eixo da barragem, geralmente, entre o eixo da barragem e o pé de jusante. Possui também o propósito de controlar a linha freática, o fluxo pela fundação (LADEIRA, 2007). Já o dreno de pé desempenha a função de captar a água e conter as matérias granulares que podem desprender pelo dreno horizontal (CRUZ, 2014).

Para o controle de percolação de água no solo do maciço, utilizam-se filtros verticais e tapetes horizontais combinados. Assim, o fluxo de água é interceptado antes que se inicie uma erosão interna. Para isso, Terzaghi sugere o dimensionamento destas estruturas civis por meio de equações que correlacionam os diâmetros dos materiais que constituirão o filtro (NOGUEIRA, 1981).

O sistema de drenagem interna de uma barragem de terra geralmente constitui-se de camadas de materiais com elevada permeabilidade, na maioria dos casos, de areia natural (MARANGON, 2004). A areia natural é um material granular, sem forma e volume definidos, geralmente inerte, obtida em unidade de mineração podendo ser extraída do leito de rios, depósitos lacustres ou dunas, sendo que a maior parte produzida no Brasil é advinda de leito de rios (HOLSBACH, 2004).

No entanto, há barragens em que o sistema de drenagem são compostos de areia artificial ou mista, uma mistura em determinadas proporções de areia natural e artificial. Itaipu é exemplo deste uso de composição em seu sistema de drenagem (ITAIPU, 2009). Segundo Gonçalves (2005), areia artificial é derivada da rocha que passa por um processo de britagem, a qual é beneficiada até atingir a granulometria desejada, ou seja, que o agregado possa ser trabalhado até atingir uma granulometria menor que 4,8 mm (granulometria padrão da areia natural, conforme ABNT, 2009 – NBR 7211 – Agregados para concreto - Especificação).

Caso ocorram trincas ou falhas construtivas, as funções dos filtros podem ser prejudicadas devido ao carreamento de partículas de silte e argila que, conseqüentemente, acabarão por induzir a colmatação (LADEIRA, 2007). Assim, a composição granulométrica dos filtros necessita atender aos critérios de erosão interna – os vazios contidos nos filtros devem ser menores que as partículas que possam se desprender do maciço – e o critério de permeabilidade – os vazios contidos nos filtros devem ser suficientemente maiores que o dos solos a serem protegidos (LIMA, S/D).

2.2 PERMEABILIDADE DE MACIÇOS COMPACTADOS

2.2.1 Conceitos iniciais

Permeabilidade é a propriedade que os corpos possuem de permitirem a percolação de água ou de outros fluídos através de seus vazios. No caso dos solos, consiste em medir a velocidade de escoamento do fluído em uma determinada amostra (CAPUTO,2012).

A água, elemento comumente presente em solos, ocupa parcialmente ou quase a totalidade de seus vazios. Assim, quando este fluído é submetido a diferenças de potenciais, acaba por se descolar no solo originando tensões desiguais (DIEMER, 2008).

Segundo Caputo (2012), os solos constituem-se de três fases, sendo elas: sólida (partículas sólidas), líquida (água) e gasosa (ar). A fase sólida forma a estrutura dos solos (esqueleto), em que os vazios são preenchidos por água e ar. A água presente nos solos pode ser classificada como:

- Água de constituição: parte constituinte da estrutura molecular da estrutura sólida;
- Água adsorvida ou adesiva: adere ou envolve a partícula sólida;
- Água livre: ocupa os vazios de acordo com as leis da hidráulica;
- Água higroscópica: presente nos solos seco ao ar livre;
- Água capilar: sobe pelos interstícios capilares deixados pelas partículas solidas, geralmente solos finos.

O estudo de percolação de água possui importância significativa, pois interfere em diversos problemas práticos da engenharia: recalques, que são expressos com a diminuição dos vazios dos solos devido à expulsão das gotículas de água; cálculo geral de vazões, que é a quantidade de água infiltrada nos solos; estabilidade de taludes, ligado às pressões neutras dos solos; além dos estudos de fuga d'água de reservatórios de barragens de terra, ligado diretamente à segurança de barragens (PINTO, 2006).

2.2.2 Determinação do coeficiente de permeabilidade e a lei de Darcy

A determinação da permeabilidade segue os princípios da lei de Darcy, proposta em 1856, a qual define o coeficiente de permeabilidade (k). Esse parâmetro mede a capacidade de escoamento da água através dos sólidos e vazios do solo, ou seja, mensura a condutividade do fluido percolado. A Tabela 1 apresenta o coeficiente de permeabilidade para alguns solos sedimentares.

Tabela 1: Valores típicos de coeficiente de permeabilidade

Solos	Coeficiente de permeabilidade k (m/s)
Argilas	$< 10^{-9}$
Siltes	10^{-6} a 10^{-9}
Areias argilosas	10^{-7}
Areias finas	10^{-5}
Areias medias	10^{-4}
Areias grossas	10^{-3}

Fonte: Adaptada de PINTO, 2006.

Experimentalmente, 1856, Darcy apresenta a Equação 1 para a velocidade de percolação de água através dos solos. Nessa equação, a velocidade de percolação (v) é diretamente proporcional ao gradiente hidráulico (i), ou seja, sua expressão quantifica a determinação do coeficiente de permeabilidade (k) de um solo (DAS, 2011).

$$v = k \cdot i \quad (1)$$

Sendo a velocidade também a razão entre a vazão e a área, logo a vazão será de acordo com a Equação 2, em que o gradiente hidráulico $\left(\frac{h}{L}\right)$ pode ser expresso pela divisão da carga que se dissipa na percolação (h), por comprimento de percolação da camada de solo (L) (PINTO, 2006).

$$Q = k \cdot i \cdot A \quad (2)$$

Sendo: Q = vazão;

A = área da seção;

k = constante de permeabilidade (particular);

$\frac{h}{L}$ = gradiente hidráulico (i).

Esta lei é válida para escoamento “laminar” definido quando as trajetórias das partículas de água não se cortam, caso contrário denomina-se turbulento. No entanto, pode ser considerado o escoamento laminar em grande parte dos solos naturais (CAPUTO, 2012).

Para a determinação do coeficiente de permeabilidade (k) podem ser empregados método indireto, ensaios de campo ou ensaios de laboratório. O método indireto considera que o recalque de um solo que é submetido a compressão está relacionado a velocidade com que a água deste solo sai dos seus vazios. Desta forma, por meio de ensaios de adensamento, pode-se obter os recalques ao longo do tempo e com base nas análises destes ensaios e de teorias correspondentes, pode-se obter o coeficiente de permeabilidade do solo ensaiado (PINTO, 2006). Segundo o mesmo autor, os ensaios de campo podem medir o coeficiente de permeabilidade do solo através de um furo de sondagem de simples reconhecimento. Neste ensaio, a operação de perfuração é interrompida e o tubo de revestimento é preenchido com água até nível constante. Posteriormente, mede-se a vazão necessária para manter o nível constante, calculando-se, assim o coeficiente de permeabilidade. Para isso, é preciso o conhecimento de diversos parâmetros como altura de perfuração, espessuras das camadas de solo e posição do nível d'água, dentre outros (PINTO, 2006).

Sobre os ensaios de laboratório a determinação do coeficiente de permeabilidade é realizada através de permeômetros, o quais podem ser de dois tipos, o de carga constante e o de carga variável (DAS, 2011).

- **Permeabilidade de carga constante**

O ensaio é executado geralmente para solos granulares como areias e pedregulhos, por exemplo, onde k é determinado medindo-se a quantidade de água

que atravessa em um determinado tempo t para uma amostra na qual a altura e a seção são conhecidas. A água é mantida em nível constante e recolhida em um recipiente graduado onde é medida (Figura 2). O coeficiente de permeabilidade é calculado pela lei de Darcy, Equação 3 (CAPUTO, 2012).

$$Q = k \cdot \frac{h}{L} \cdot A \cdot t \quad (3)$$

Sendo: k = coeficiente de permeabilidade da amostra;

Q = vazão;

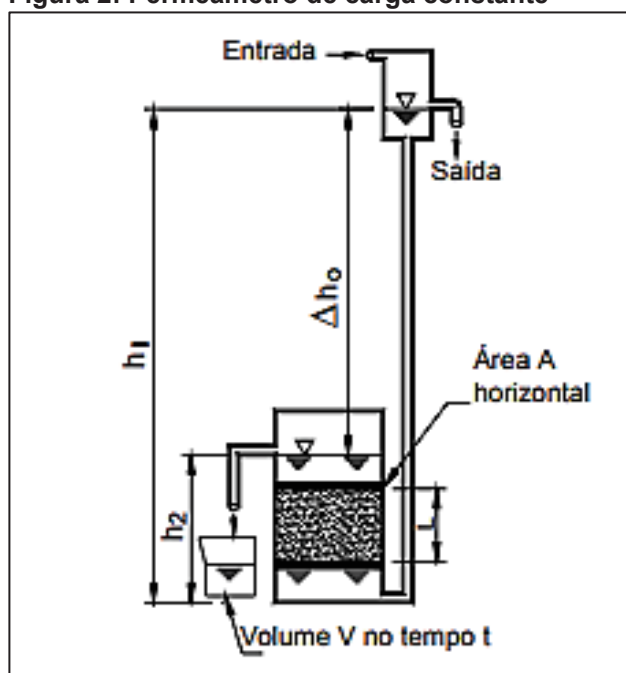
L = altura da amostra;

A = área da amostra onde flui a água;

h = carga hidráulica;

t = tempo de escoamento da água;

Figura 2: Permeâmetro de carga constante



Fonte: Ribeiro, 2002

- **Permeabilidade de carga variável**

Este ensaio é utilizado para solos com baixa permeabilidade como argilas, por exemplo, a determinação por esse método é realizada como mostra o esquema

apresentado na Figura 3, em que a água atravessa a amostra de solo e com um piezômetro instalado mede-se a diferença de carga inicial h_1 e a carga final h_2 em um determinado período de tempo, Equações 4 e 5 (DAS, 2011).

$$K = \left[\frac{a \cdot L}{A \cdot \Delta T} \right] \cdot \left[\ln \frac{h_1}{h_2} \right] \quad (4)$$

$$K = 2,303 \cdot \left[\frac{a \cdot L}{A \cdot \Delta T} \right] \cdot \left[\log \frac{h_1}{h_2} \right] \quad (5)$$

Sendo: k = coeficiente de permeabilidade da amostra;

a = área da seção transversal do piezômetro;

L = altura inicial da amostra;

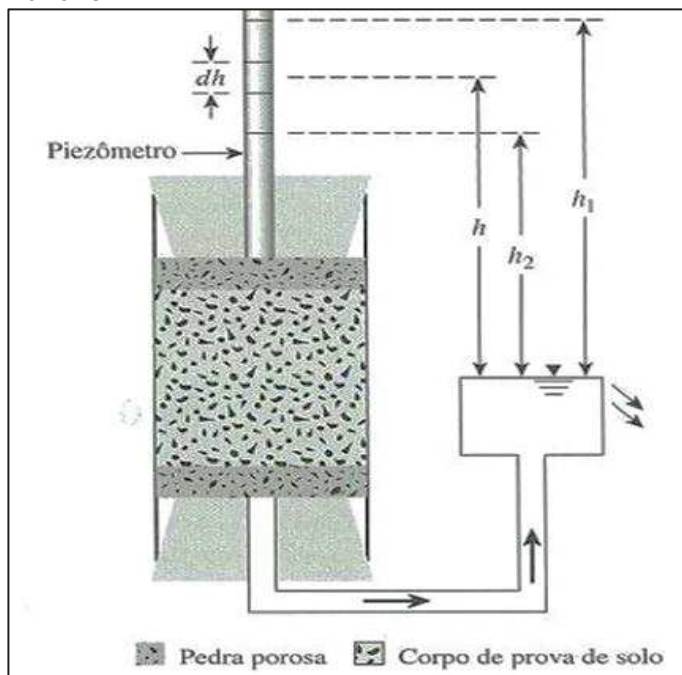
A = área inicial da amostra por onde flui a água;

h_1 = carga hidráulica no instante t_1 ;

h_2 = carga hidráulica no instante t_2 ;

Δt = diferença de tempo entre os instantes t_1 e t_2 ;

Figura 3: Esquema de permeâmetro com carga variável



Fonte: DAS, 2011.

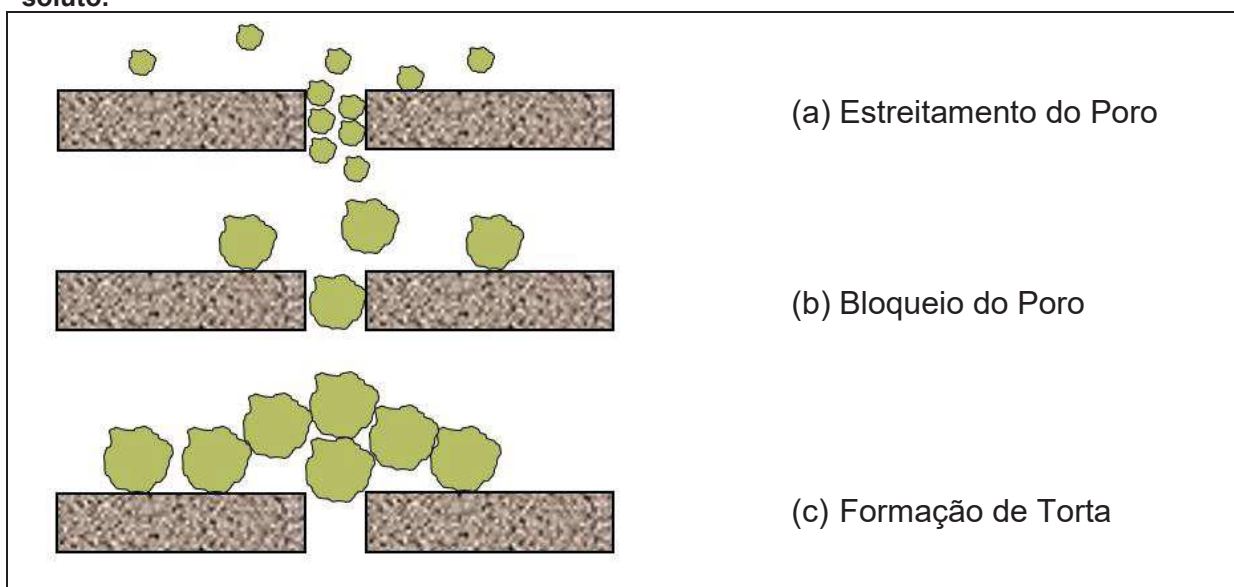
2.3 COLMATAÇÃO DE FILTROS

2.3.1 Mecanismo de Colmatação

Segundo Schäfer *et al.* (2004), os mecanismos de colmatação podem ocorrer de diferentes formas: (i) colmatação externa, ocasionada por deposição e processos de precipitação e até mesmo com a formação de uma camada de gel; (ii) colmatação interna, ocorre com o bloqueio ou estreitamento dos poros, devido a interações soluto-membrana (filtro). De acordo com o mecanismo, o tamanho da partícula de soluto (fluido percolante) também interfere no processo (Figura 4). A saber:

- Diâmetro do Solute < Diâmetro do poro do filtro → Adsorção nas paredes internas e estreitamento do poro.
- Diâmetro do soluto \approx Diâmetro do poro do filtro → Entupimento ou bloqueio total do poro;
- Partículas de Solute > Diâmetro do poro do filtro → Ocorre a deposição de material na superfície e formação de um material compactado.

Figura 4: Mecanismos de formação e colmatação, com relação ao tamanho da partícula do soluto.



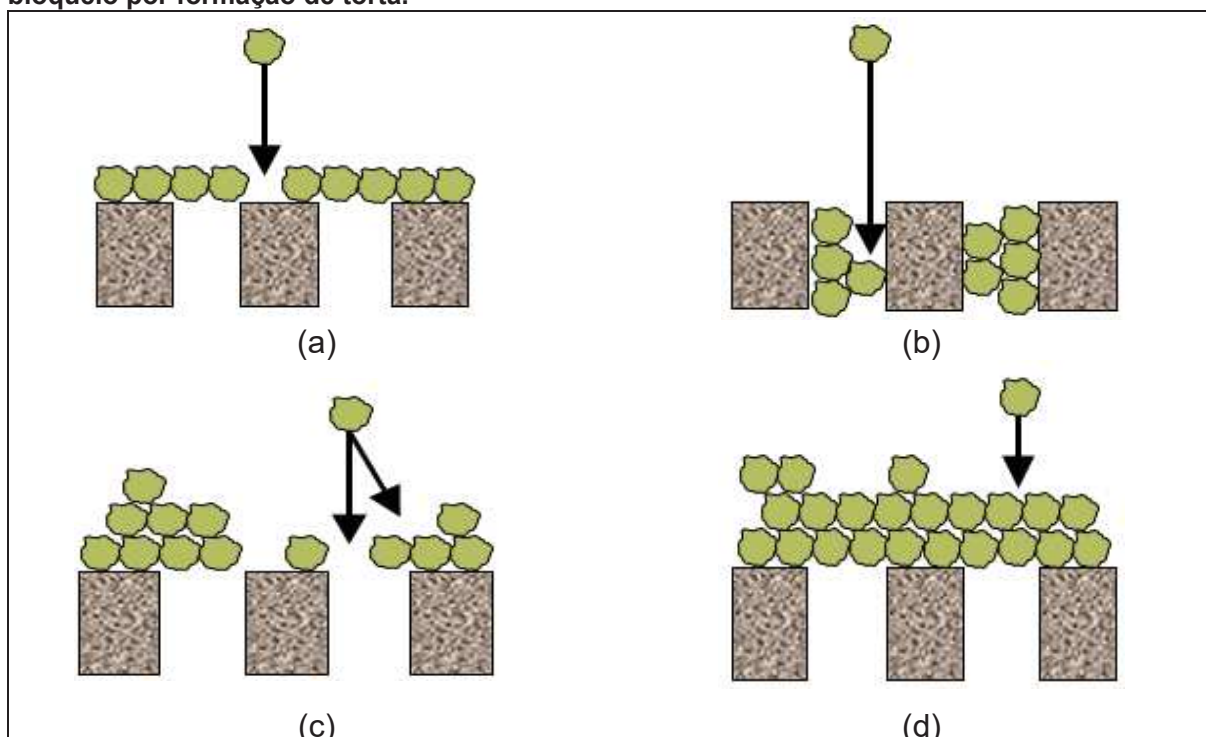
Fonte: Adaptada de SCHÄFER *et al.*, 2004.

O processo de adsorção das partículas nos orifícios do filtro pode provocar uma queda no fluxo, menos severa do que quando ocorre o completo entupimento

do poro, ocasionando a perda da permeabilidade (SCHÄFER *et al.*, 2004). Há também, diferentes modelos de mecanismos de bloqueio de membranas/ filtros, com relação à disposição das partículas do soluto (BLANKERT *et al.*, 2006):

- Bloqueio completo dos poros: ocorre quando as partículas que alcançam a superfície contribuem para o bloqueio do poro. No entanto, neste modelo pressupõe-se que não há superposição, porém, as partículas irão obstruir por completo o fluxo, reduzindo o mesmo, a zero (Figura 5.a);
- Bloqueio interno ou estreitamento: ocorre quando as partículas adentram ao canal do poro reduzindo sua área útil de permeabilidade, ocasionando um estreitamento e comprometendo o fluxo (Figura 5.b);
- Bloqueio parcial/intermediário dos poros: ocorre quando partículas se depositam nos poros ou na superfície da membrana, ocasionando o bloqueio ou não dos poros atingidos (Figura 5.c);
- Bloqueio por torta ou camada de gel: é colmatação externa ocasionada quando partículas se acumulam sobre a superfície do poro formando uma espécie de torta ou camada de gel, sendo responsável pela resistência hidrodinâmica adicional. Essa camada formada não possui uma influência sobre a área útil do poro, mas compromete o fluxo (Figura 5.d).

Figura 5: Possibilidade de deposição de partículas nos poros. (a) bloqueio completo dos poros; (b) bloqueio interno ou estreitamento dos poros; (c) bloqueio parcial dos poros; (d) bloqueio por formação de torta.



Fonte: Adaptada de BLANKERT *et al.* 2006.

2.3.2 Colmatação em filtros

Para que um sistema drenante mantenha-se em funcionamento é necessário manter sua capacidade filtrante/drenante íntegra, levando em consideração o seu dimensionamento, características do material e métodos construtivos (PENG, 2004). No entanto, o sistema pode vir a ter seu desempenho comprometido quando ocorre o entupimento dos vazios do meio, fenômeno esse chamado de colmatação (ALVES, 2006).

O fenômeno de redução da área transversal dos espaços vazios de um determinado meio poroso afeta a capacidade drenante do meio e ocorre ao longo do tempo, a qual pode ocorrer em diferentes formas: colmatação física, química e biológica (REMÍGIO, 2006).

A colmatação física refere-se ao processo de redução da capacidade drenante de um filtro. Ocorre pelo “cegamento” ou bloqueamento dos poros, ou seja, conduz para a redução da capacidade de descarga do dreno, levando a perda de controle do fluxo pré-estabelecido (PALMEIRA E GARDONI, 2000).

Já o processo de colmatação química se dá quando ocorre reações químicas entre elemento contido no fluido percolante, que resulta na formação de um material precipitado, ou que possa vir a precipitar, comprometendo assim, o espaço disponível para a passagem do fluido (NOGUEIR JR., 1988). Ainda segundo este autor, uma das formas de colmatação é pela precipitação de ferro, elemento este que pode ser transportado na forma de íons pelas águas que percolam através da barragem. Estas águas, por sua vez, passam de um meio redutor para um meio oxidante, perdendo sua solubilidade e ocasionando precipitação na forma de hidróxido ou óxido. O acúmulo desses compostos ao longo do tempo, tende a preencher os vazios dos filtros e drenos diminuindo sua permeabilidade, alterando suas características originais e podendo levar ao aumento das subpressões na barragem (NOGUEIRA JR, 1986).

Segundo Vandevivere *et al.* (1992) a colmatação biológica é um fenômeno resultante da influência microbiana em filtros, devido ao aumento populacional das bactérias que comprometem a permeabilidade do solo. Esta pode ocorrer devido ao acúmulo de células microbianas, produção de gases, acúmulo de sais insolúveis ou ainda devido atividade de ferrobactérias. Há diferentes tipos de atividades

bacterianas, no entanto, os processos que envolvem compostos ferrosos, ocasionados por ferrobactérias, são os mais frequentes, severos e danosos (NEVES, 2015).

2.4 PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICO E CRESCIMENTO BACTERIOLÓGICO

A literatura apresenta uma quantidade maior de ensaios que expressam importância, porém neste capítulo será apresentado os mais relevantes de acordo com a realidade dos nossos laboratórios.

a. Potencial hidrogeniônico (pH)

O pH é um parâmetro de grande importância pois representa a concentração dos íons de hidrogênio (H^+) e exprime o nível de acidez ou alcalinidade de uma solução (CARVALHO, 2010), sendo este um parâmetro de grande importância para o crescimento microbiano. Cada micro-organismo possui um pH ótimo de crescimento, sendo que este pode variar numa faixa de 2-3 unidades.

A maioria dos ambientes naturais apresentam pH variando de 5 a 9, faixa esta que corresponde aos micro-organismos mais comuns (MANDIGAN, MARTINKO, PARKER, p.147, 2008). Segundo KUNTZE (1982), a atividade de ferrobactérias filamentosas ocorre em ambiente propício, com pH de 5 a 8 (apud CORREIA, 2014).

b. Condutividade elétrica

Definido pela capacidade de uma solução aquosa de conduzir corrente elétrica, este padrão relaciona-se a presença de íons dissolvidos e sua concentração

na amostra, sua capacidade de mobilidade e a valência deles bem como a temperatura de medição. Este procedimento não é capaz de determinar quais são os íons presentes na água, mas o valor expresso pela condutividade elétrica pode auxiliar na identificação da contaminação de ambientes aquáticos via poluição de resíduos de mineração, esgoto e ainda resíduos urbanos (CARVALHO, 2010)

c. Temperatura

O parâmetro físico temperatura apresenta grande importância em análises de águas, uma vez que pode afetar a saturação de oxigênio dissolvido em corpos d'água, influenciar nas taxas de reações químicas e biológicas (JORDÃO, 1995). Com relação os microrganismos, em especial, as bactérias, de um modo geral apresentam bom desenvolvimento de crescimento nas faixas de temperatura entre 35 °C e 40 °C (PERES, 2006).

d. Turbidez

Parâmetro ocasionado pela presença de matéria em suspensão que impede a passagem de luz. Pode ser avaliada por um turbidímetro, o qual usa o princípio da refração à luz causada pelos sólidos em suspensão (JORDÃO, 1995).

e. Sólidos Totais

São caracterizados como sólidos totais todas as partículas presentes em suspensão ou em solução, sedimentáveis ou não orgânicas ou minerais. Quando se determina a quantidade total de sólidos presentes em uma amostra denomina-se sólidos totais (JORDÃO, 1995).

A separação do tipo de sólidos presentes em uma amostra pode ser determinada em laboratório, de acordo com método estabelecido pela SABESP (1999), a qual classifica:

- Totais: Massa sólida obtida através da evaporação, em estufa, da parte líquida da amostra expressa em mg/L;
- Fixos: Matéria residual retida na cápsula de porcelana após a calcinação dos sólidos totais em forno-mufla a 550°C, também expressos em mg/L.

Em segurança de barragens o controle de sólidos está relacionado ao possível carreamento de partículas do material de composição dos taludes ou de elementos que compõem a barragem (CARDIA, LANGE, 2017)

f. Crescimento microbiológico

Os microrganismos estão divididos em quatro grupos distintos sendo eles: algas, bactérias, fungos e protozoários. As bactérias são unicelulares e procarióticas, possuem uma alta taxa de reprodução e uma grande capacidade de decomposição de diferentes substratos, como matéria orgânica e ciclagem de elementos. Apresentam as mais variadas formas, sendo elas, esféricas, bastonetes espiraladas dentre outras e ainda tamanhos variáveis (REMÍGIO, 2006).

Para a reprodução dos microrganismos há necessidade de substâncias químicas, que provem do ambiente e são denominados de nutrientes. Estes são transformados, devido a processos químicos dentro do microrganismo, em componentes específicos para cada tipo de ser vivo. Para que todo esse processo seja possível, o microrganismo necessita de energia, a qual também é advinda do meio ambiente por meio de energia luminosa ou reações químicas (REMÍGIO, 2006).

Um fenômeno de grande importância na engenharia é a ação das ochre bactérias ou ferrobactérias. Bactérias como *Leptothrix*, *Gallionella* e *Sphaerotilus* são as principais responsáveis pela precipitação do hidróxido de ferro em quantidades consideráveis. Tais bactérias podem estar presentes na água dos reservatórios, nos filtros das barragens e drenagens podendo ocasionar entupimentos destes dispositivos acarretando no aumento de poropressões que quando não assistida pode ocasionar instabilidade no aterro (NEVES, 2015).

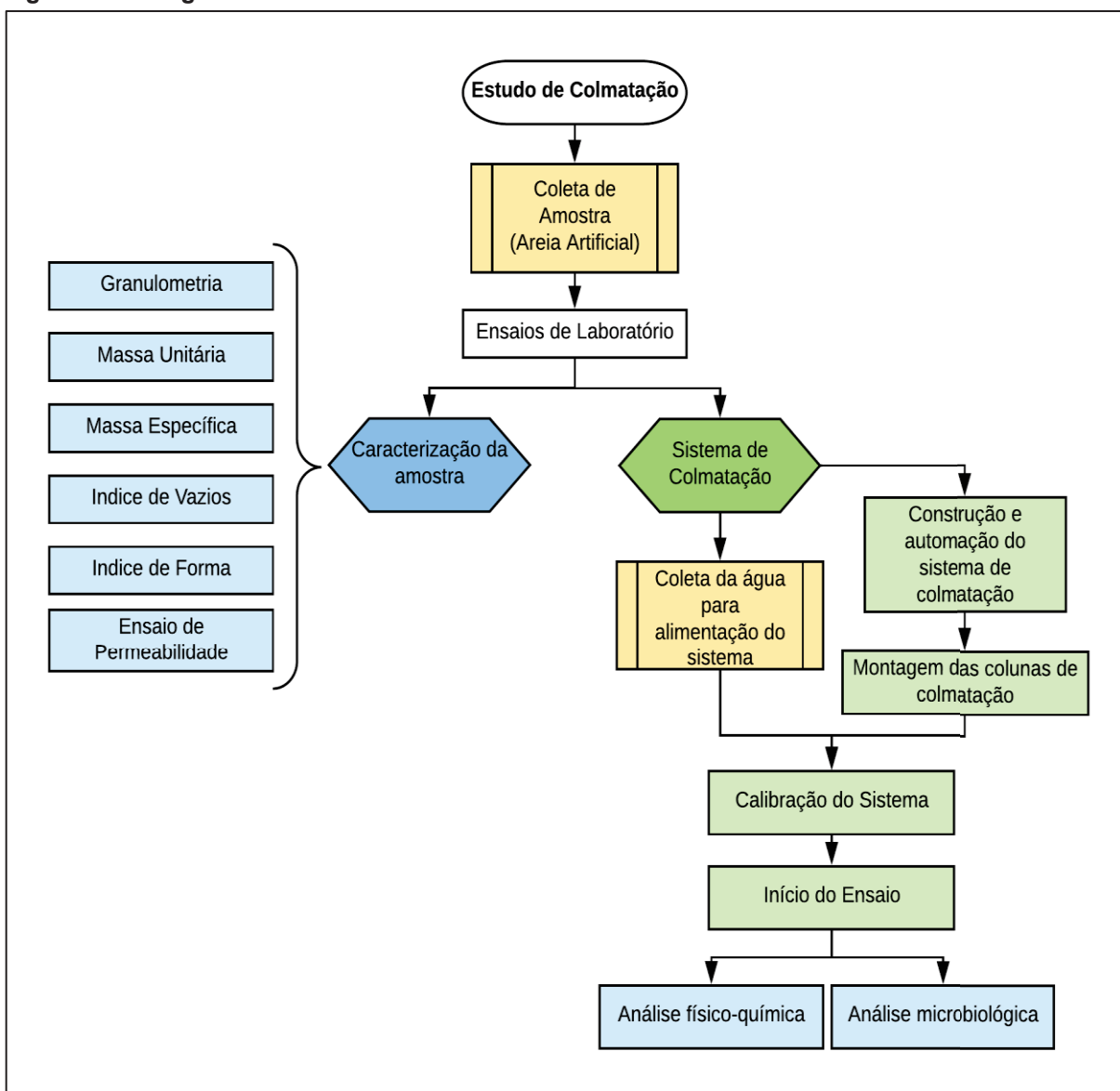
3 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi dividido em duas etapas principais, a saber:

- Caracterização geológico-geotécnica da amostra;
- Ensaio adaptado para análise de colmatação de filtros granulares.

A Figura 6 apresenta um fluxograma das etapas do trabalho.

Figura 6: Fluxograma do trabalho.



Fonte: Autor, 2018.

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Material granular

Para a pesquisa foi utilizado como material uma amostra de areia de basalto britado, disponível no Laboratório de Solos da UTFPR-TD (Figura 7).

Figura 7: Amostra do material utilizado para estudo



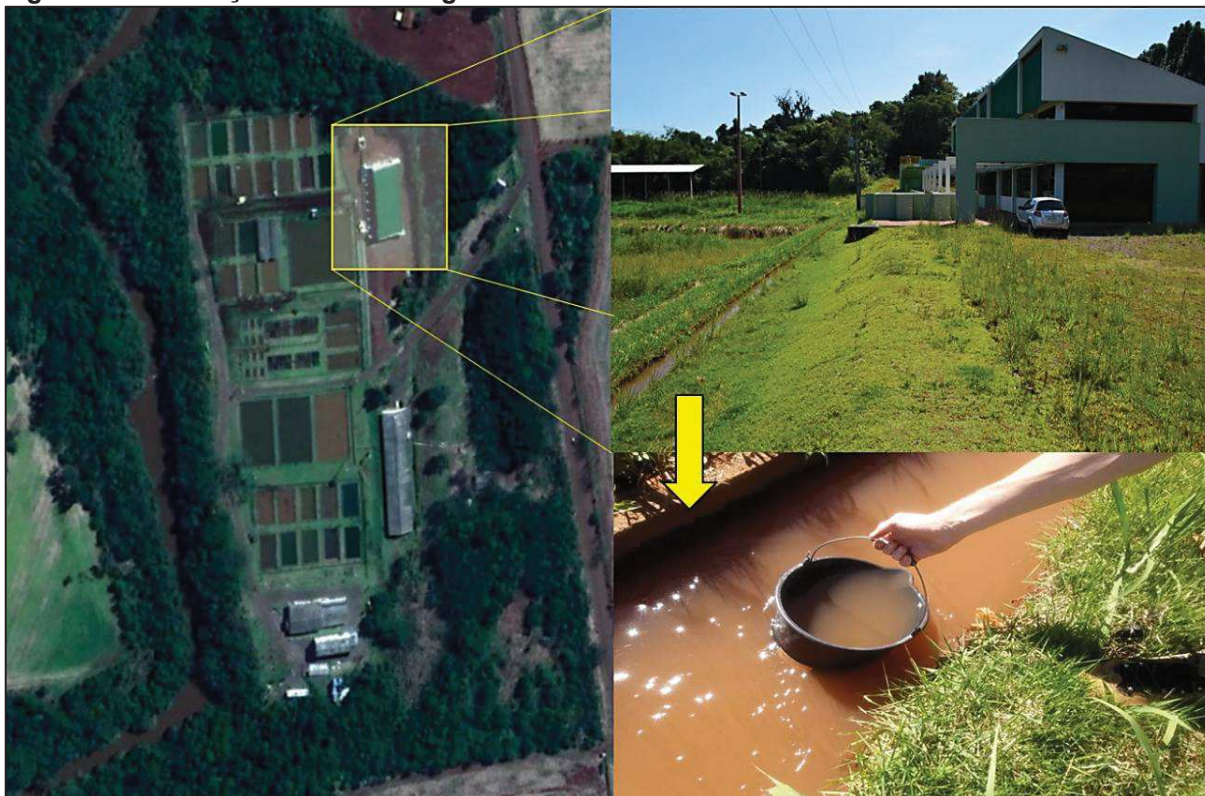
Fonte: Acervo do autor, 2018.

3.1.2 Água de percolação

A água de abastecimento do sistema foi coletada no rio São Francisco situado na cidade de Toledo – PR, saída para a linha Mandarin (Figura 8). O ponto de coleta estava localizado dentro das instalações do InPAA (Instituto de Pesquisa em Aquicultura Ambiental), definido pelas coordenadas 24°46'45,83" S e

53°43'25,49" O. A escolha para o local de coleta, foi definida frente à facilidade de acesso e segurança aos pesquisadores, pois neste local foi possível chegar próximo ao sistema de canaletas do instituto, o qual capta água do rio.

Figura 8: Localização e coleta de água



Fonte: Acervo do autor, 2018.

Ao realizar a coleta da água foi conferido *in loco* a temperatura (23 °C), e ao chegar ao laboratório de Saneamento do Departamento de Engenharia Civil da UTFPR-TD, foram efetuados os testes de parâmetros físico-químico da amostra, para então, inseri-la nos reservatórios do sistema.

3.2 CARACTERIZAÇÃO GEOLOGICA-GEOTÉCNICA DA AMOSTRA

Para fins de caracterização geológica-geotécnica da amostra de areia artificial foram realizados nos Laboratórios de Solos e de Materiais de Construção Civil da UTFPR-TD, os principais ensaios de caracterização física. O material foi preparado

segundo preconiza as normas técnicas da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT).

Os ensaios realizados seguiram os procedimentos indicados pelas seguintes normas:

- NBR 6457/1986 - Preparação para ensaio de compactação e ensaio de caracterização;
- NBR NM 248/2003 - Determinação da composição granulométrica de agregados;
- NBR NM 45/2006 - Determinação da massa unitária e do volume de vazios;
- NBR NM 52/2009 - Determinação da massa específica e massa específica aparente;
- NBR 12004/1990 - Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos;
- NBR 12051/1991 - Determinação do índice de vazios mínimo de solos não coesivos;
- NBR 13292/1995 - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante.

3.2.1 Composição granulométrica

Após a coleta da amostra a mesma foi seca em estufa com temperatura de $105\pm 5^{\circ}\text{C}$, separada em pequenas porções de acordo com a norma NBR NM 248 (Determinação da composição granulométrica de agregados).

A amostra foi peneirada no conjunto denominado série normal [(4,8; 2,4; 1,2; 0,6; 0,3; 0,15; 0,075) mm e fundo]. O procedimento foi realizado com apoio de peneirador elétrico durante 15 minutos e as pesagens com a balança de precisão, com aproximações em 0,01% em peso da amostra.

Esse ensaio também possibilitou determinar a Dimensão máxima característica (D.M.C.) e o Módulo de finura (M.F.). A D.M.C. foi obtida em

milímetros, como sendo a abertura da malha da peneira na qual o agregado apresentou uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em peso. Já o M.F. foi encontrado através da soma das porcentagens retidas acumuladas nas peneiras da série normal, dividida por 100.

3.2.2 Massa unitária e do volume de vazios

Para este ensaio foi preparado uma amostra com aproximadamente 150% do volume do recipiente utilizado para o ensaio (amostra previamente seca em estufa). Então, determinou-se o peso do recipiente em kg, utilizado para o ensaio. Com o material já seco, o recipiente foi preenchido em três camadas de 1/3 da altura e, em cada camada, aplicou-se 25 golpes com uma haste metálica, distribuídos de maneira uniforme. Na primeira camada procurou-se evitar que a haste tocasse o fundo do recipiente, enquanto para as camadas subsequentes evitou-se atingir a camada inferior.

Após enchimento total, uniformizou-se a superfície com o auxílio da haste e determinou-se o peso do conjunto (recipiente e agregado), em kg (Figura 9). A pesagem foi realizada também com o agregado em estado solto, ou seja, sem que houvesse a compactação com os golpes da haste metálica para finalmente determinar o peso unitário aparente (Equação 6).

Figura 9: Recipiente completamente cheio e arrasado



Fonte: Acervo do autor, 2018

$$\rho_a = \frac{p_{ar} - p_r}{V} \quad (6)$$

Sendo: ρ_a = peso unitária do agregado, em kg/m³;

V = volume do recipiente em m³;

p_{ar} = peso da amostra e recipiente;

p_r = peso do recipiente.

3.2.3 Massa específica e massa específica aparente

Para a obtenção desse parâmetro a amostra deve estar em uma condição definida por saturada superfície seca (“sss”)². Para isso, foi necessário coletar uma amostra de aproximadamente 1 kg de material e submergi-la em água por 24 horas. Após isso, escoou-se a água com o cuidado de não se perder os finos e a amostra foi espalhada sobre uma bandeja para que esta pudesse secar (com o auxílio de um secador).

Então colocou-se a amostra em um molde apropriado, de acordo com a norma NM45/2006. Foram realizados 25 golpes para se verificar se ocorreu o desmoronamento da superfície ou se a mesma permaneceu no formato do cone do molde após sua remoção. O procedimento de secagem da amostra continuou até que o tronco do cone desmoronasse parcialmente ao ser retirado do molde, condição esta que representou a “sss” (Figura 10).

Após o preparo da amostra como descrito acima, iniciou-se o ensaio de massa específica. Isto posto, foi colocado 500 g de amostra em recipiente de vidro apropriado para o ensaio. Em seguida, completou-se o frasco com água, promovendo uma leve agitação de modo a retirar as bolhas de ar. Então, o frasco ficou em repouso em banho-maria à temperatura de 20°C por um período de 1 hora. Após isso, secou-se o frasco e realizou-se a sua pesagem. Posteriormente, a amostra do recipiente foi removida e levada para estufa por aproximadamente 24 horas para em seguida realizar a pesagem seca.

² São as partículas de agregado que culminaram suas possibilidades de absorver água e mantém a superfície seca (ABNT, p.2, 2009).

Figura 10: Amostra ao atingir a condição saturada superfície seca (sss)



Fonte: Acervo do autor, 2018.

Após todo o procedimento supracitado, definiu-se os valores de massa específica do agregado em condição saturada superfície seca (Equação 7) e da massa específica (Equações 8).

$$d_2 = \frac{m_s}{V - V_a} \quad (7)$$

Sendo: d_2 = peso específico do agregado saturado superfície seca, em g/cm³;

m_s = peso da amostra na condição saturada superfície seca, em g;

V = volume do frasco, em cm³;

V_a = volume de água adicionada ao frasco, em cm³.

$$d_3 = \frac{m}{(V - V_a) - \frac{m_s - m}{\rho_a}} \quad (8)$$

Sendo: d_3 = peso específico do agregado, em g/cm³;

m_s = peso da amostra na condição saturada superfície seca, em g;

m = peso da amostra seca em estufa, em g;

V = volume do frasco, em cm³;

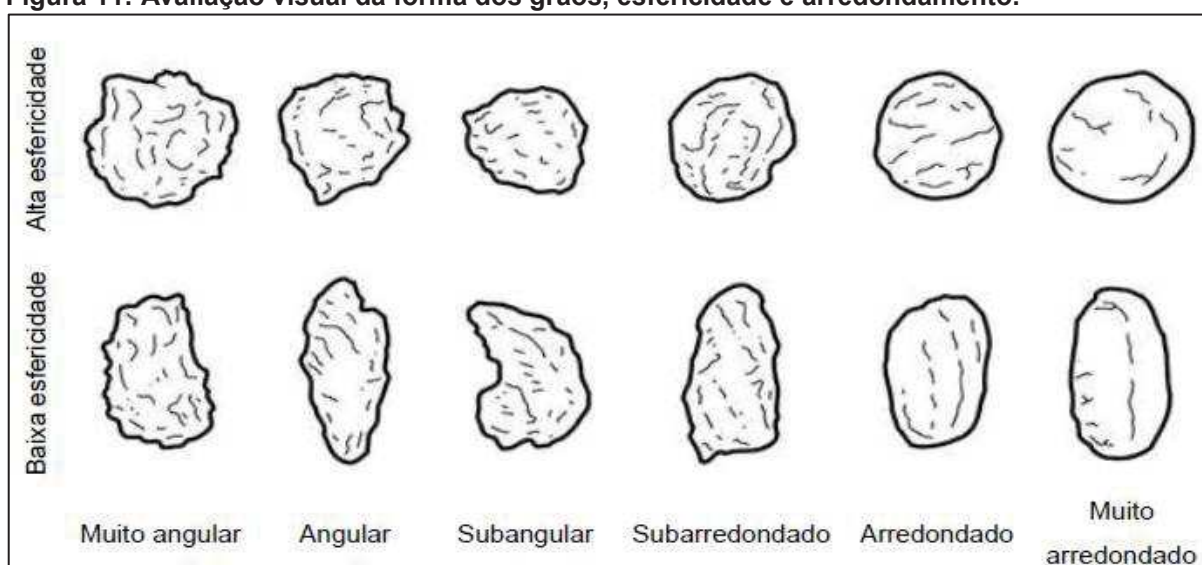
V_a = volume de água adicionada ao frasco, em cm³;

ρ_a = peso unitário aparente do agregado, em g/m³.

3.2.4 Determinação do índice de forma

Uma característica que auxilia na identificação do material consiste na avaliação visual da forma dos grãos de acordo com a esfericidade e o arredondamento (POWER, 1953). Segundo este autor, o grau de arredondamento e o grau de esfericidade do material de estudo podem ser correlacionados ao se comparar com as ilustrações da Figura 11. Quanto ao grau de esfericidade, este expressa o quanto o formato do grão se aproxima de uma esfera perfeita, já o grau de arredondamento refere-se ao quão suave ou aguda são as bordas das partículas que compõe o material (BARROS *et al.*, 2007). Estas análises foram realizadas com o auxílio de microscópio portátil de maneira a se avaliar o formato dos grãos, em uma porção de 0,600 kg da amostra total, contemplando um número de grãos superior a 100.

Figura 11: Avaliação visual da forma dos grãos, esfericidade e arredondamento.



Fonte: Power, (1953) adaptado por Decesaro, (2016).

3.2.5 Índices de vazios máximo e mínimo

Para determinação dos índices de vazios máximos e mínimos, fez-se uso de um funil, cilindro metálico e uma mesa vibratória. Primeiramente, foram obtidas as dimensões do cilindro metálico, a fim de se calcular seu volume interno, e seu peso.

A determinação do índice de vazios máximo procedeu-se segundo a NBR 12004/1990. Inicialmente a amostra de material foi homogeneizada, e com o auxílio de um funil despejou-se o mesmo no cilindro metálico, de forma que a altura de queda do material se mantivesse constante, e este permanecesse num estado tão fofo quanto possível. Neste processo, o funil foi movido segundo uma trajetória constante em movimento circular, da borda para o centro do molde, de forma que as camadas fossem compostas de espessuras uniformes. Preencheu-se o molde até 1 a 2 cm acima do topo e retirou-se o excesso de material com o auxílio de uma régua biselada. Após este processo se pesou o conjunto.

Após todo o procedimento definiu-se o valor do índice de vazios máximo (Equação 9)

$$e_{\text{máx}} = \frac{\bar{\delta}}{\gamma_{\text{smin}}} - 1 \quad (9)$$

Sendo: $e_{\text{máx}}$ = índice de vazios máximo;

$\bar{\delta}$ = peso específico dos grãos, em g/cm^3 ;

γ_{smin} = peso específico aparente seco mínimo da amostra, em g/cm^3 ;

Quanto à determinação do índice de vazio mínimo, esta foi feita segundo a NBR 12051/1991 com uma amostra da areia seca, a qual foi previamente homogeneizada. Com o auxílio de um funil, preencheu-se o molde com a amostra de modo que ultrapassasse o topo de 1 a 2 cm do molde. Em seguida, colocou-se o tubo guia e o disco-base da sobrecarga sobre a superfície da amostra. Fixou-se o molde a mesa vibratória (Figura 12a), cuidando sempre para que as paredes internas destes estivessem alinhadas. Depois, assentou-se a sobrecarga correspondente sobre o disco-base e a amostra sofreu vibração de acordo com a norma variando de (8 ± 2) ou (12 ± 3) minutos.

Após o processo mencionado acima, retirou-se o tubo guia e as sobrecargas (Figura 12b), removendo-se o excesso de material (Figura 12c) e o conjunto foi pesado. Através da Equação 10, obteve-se o índice de vazios mínimo.

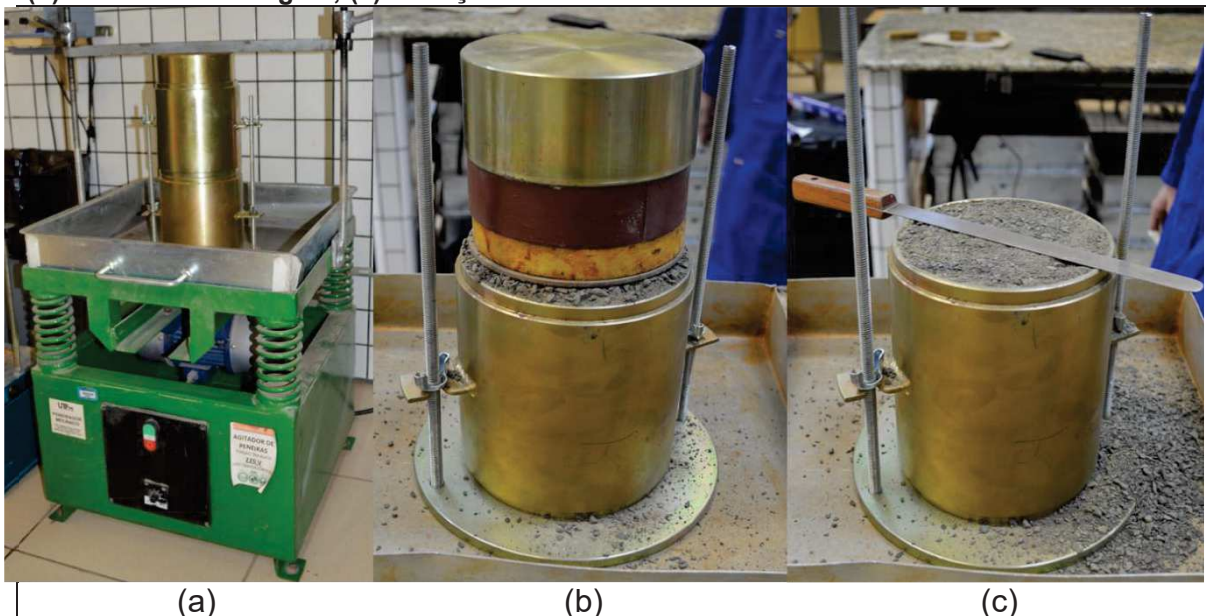
$$e_{\min} = \frac{\delta}{\gamma_{\text{smáx}}} - 1 \quad (10)$$

Sendo: e_{\min} = índice de vazios mínimo;

δ = peso específico dos grãos, em g/cm^3 ;

$\gamma_{\text{smáx}}$ = peso específico aparente seco máximo da amostra, em g/cm^3 ;

Figura 12: Sequência do ensaio de índice de vazios mínimo. (a) molde sobre a mesa vibratória; (b) retirada do tubo guia; (c) remoção do excesso de material.



Fonte: Acervo do autor, 2018.

3.2.6 Ensaio de permeabilidade

Para determinação do coeficiente de permeabilidade (k), foi realizado o ensaio da NBR 13292/1995 (Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante) com adaptações.

Com o auxílio de um paquímetro efetuou-se três medições do molde do corpo de prova, a média dos valores foi determinada, bem como conferiu-se o peso do equipamento. Tal equipamento necessitou sofrer uma adaptação, uma vez que o

molde acrílico precisou ser substituído por um tubo de PVC (policloreto de vinila) ocre de 150 mm, devido a trincas no mesmo (Figura 13).

Figura 13: Equipamento para o ensaio de permeabilidade



Fonte: Acervo do autor, 2018.

O processo de confecção do corpo de prova cilíndrico e com altura correspondente a aproximadamente a altura do cilindro central foi realizado em camadas de 2 cm do agregado. Cada camada foi compactada com auxílio de vibração proporcionada pela proximidade ao peneirador mecânico, objetivando-se atingir a compacidade desejada. No entanto, devido à baixa vibração, ocasionada pelo tamanho do molde, o qual não era compatível ao tamanho do equipamento de vibração, resultou em uma compacidade abaixo do valor pretendido.

Na parte inferior do corpo de prova colocou-se uma camada de material granular, de granulometria uniforme, chegando a uma espessura de 1 cm a 3 cm. Sob essa camada foi colocado uma gaze para se evitar a mistura de camadas. Posteriormente, com o auxílio de um funil foram formadas camadas do agregado para compor o corpo de prova até ultrapassar 2 cm do registro superior. No espaço restante do molde os mesmos procedimentos foram realizados (gaze para separar uma camada da outra; uma nova camada de material granular), então foi

posicionada a parte superior do permeâmetro, fixando-os nas hastes laterais. A Figura 14 apresenta a composição do corpo de prova, de modo ilustrativo para o ensaio de permeabilidade.

Figura 14: Ilustração das camadas do corpo de prova para o ensaio de permeabilidade (espessuras das camadas são ilustrativas).



Fonte: Acervo do autor, 2018.

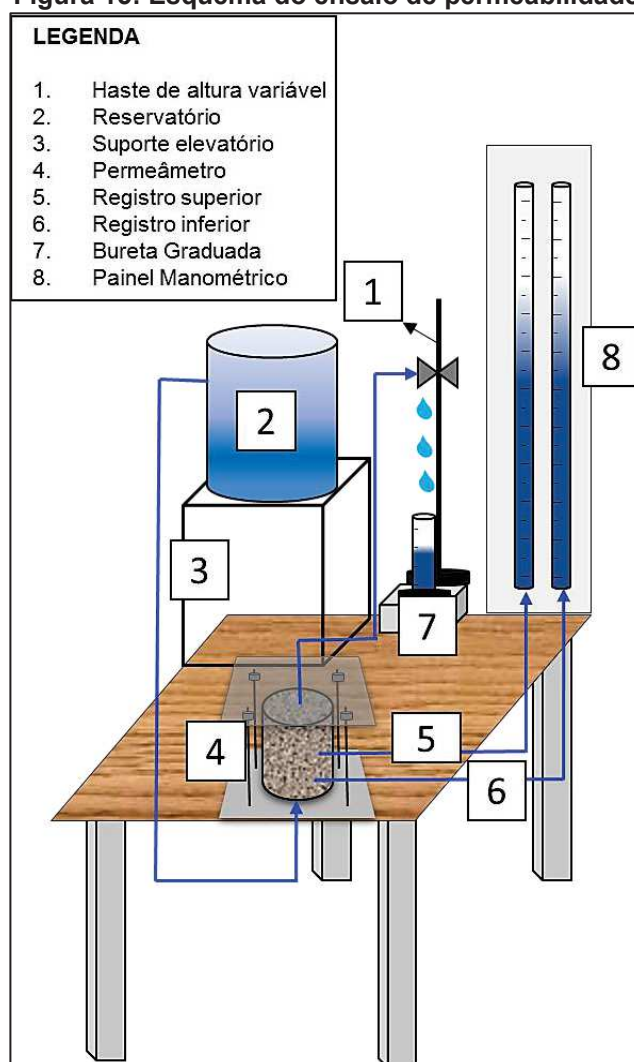
O equipamento foi conectado à rede hidráulica do ensaio através de mangueiras, enquanto o reservatório foi conectado na parte inferior do permeâmetro com o registro fechado. Também com os demais registros conectados e fechados, instalou-se a bomba de vácuo na parte superior do permeâmetro. Após, acionada a bomba de vácuo para aumentar a força de sucção para atingir 500 mmHg, como solicitado pela norma, por 15 min., o registro inferior foi aberto, permitindo a passagem de água para dentro do corpo de prova.

Porém, a máxima força de sucção atingida foi de 420 mmHg, devido ao refluxo de água na mangueira da conexão da bomba com o equipamento, e ainda, foi possível visualizar a presença de ar nas mangueiras advindas do corpo de prova. Isso pode ter ocorrido devido a troca do tubo molde do equipamento

comprometendo sua completa estanqueidade entre o tubo molde e as tampas metálicas.

Após decorrido o tempo de aplicação de vácuo, a bomba foi desligada e os registros fechados. Posteriormente, acoplou-se uma mangueira para auxiliar o enchimento da proveta e iniciar as leituras do ensaio. A Figura 15 ilustra o esquema montado para o ensaio de permeabilidade.

Figura 15: Esquema do ensaio de permeabilidade



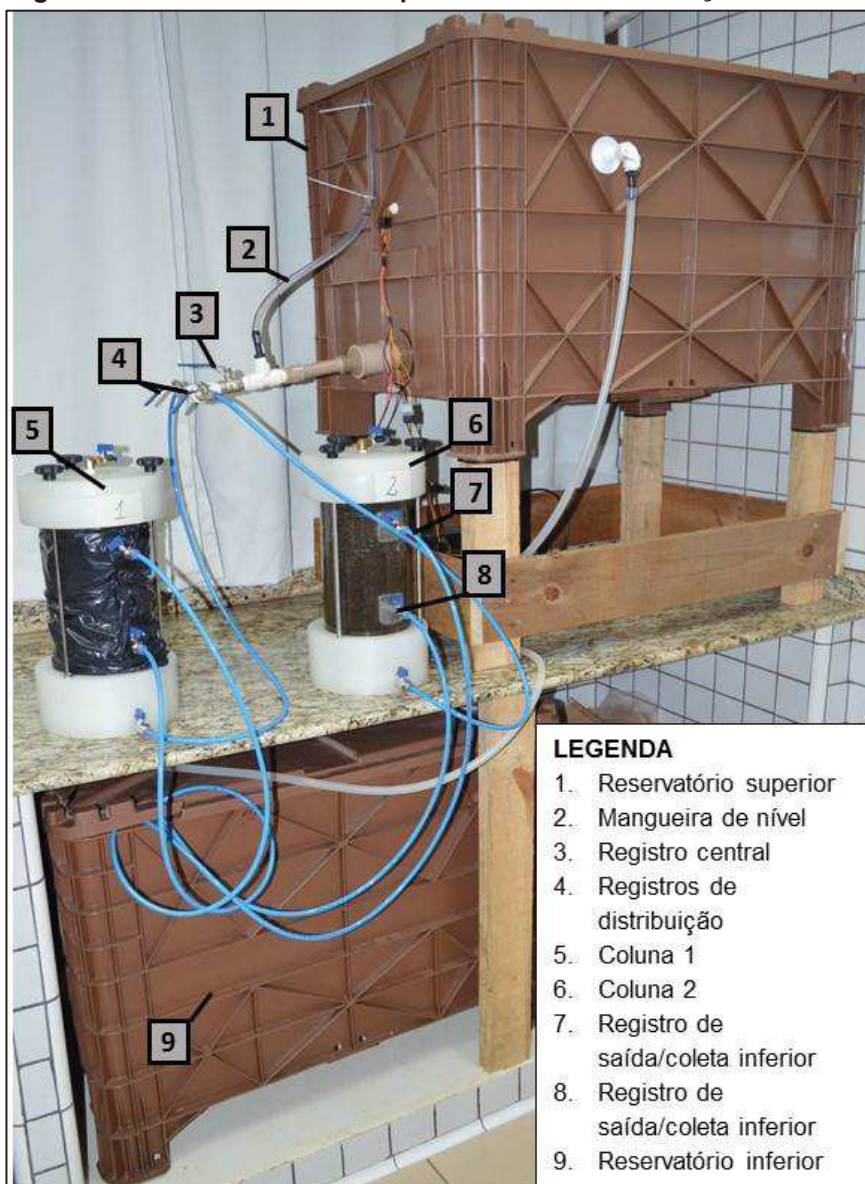
Fonte: Autor, 2018.

Devido a carência de equipamentos adequados para a atender a norma como notado na descrição acima, foram necessárias adaptações para a realização do ensaio, o que pode ter comprometido a metodologia original, ocasionando possíveis desvios.

3.3 SISTEMA PARA ANÁLISE DE COLMATAÇÃO

Para a análise de colmatação foi construído um sistema de reservatórios para o armazenamento de água de rio, visando assemelhar-se a algumas condições de um reservatório de uma barragem real. A Figura 16 apresenta o sistema usado para análise de colmatação montado para o ensaio. Os materiais utilizados para confecção do sistema foram com recursos disponíveis no Laboratório de Solos (COECI/UTFPR-TD), sendo os permeômetros em acrílico fornecidos pelo CEASB/PTI/ITAIPU, recebidos em 26 de fevereiro de 2018.

Figura 16: Sistema de colunas para análise de colmatação de filtros



Fonte: Acervo do autor, 2018.

O equipamento foi constituído por dois reservatórios (capacidade máxima de armazenamento de 370 litros cada), de PVC, ocre, sendo um instalado na parte superior de uma estrutura de madeira sobre uma bancada e o outro posicionado na parte inferior da mesma (Figura 16), porém o sistema todo operou com 430 litros.

O equipamento ainda possuía uma bomba, comumente utilizada em embarcações, da marca Seaflo, modelo SFDP-010-040-21, com uma vazão máxima de 3,8 L/min e pressão de 28,14 mca, cuja a função, foi bombear água do reservatório inferior para o superior, mantendo o nível de água constante, devido a recirculação contínua ao longo do período do ensaio. A Figura 17 mostra a bomba instalada e fixada no equipamento.

Figura 17: Bomba instalada e fixada no equipamento



Fonte: Acervo do autor, 2018.

Para garantir o nível de água do reservatório superior constante, foi prevista a colocação de uma boia com um sensor magnético instalada no reservatório superior conectada a bomba (Figura 18). Assim o sistema pode funcionar 24 horas por dia, de maneira ininterrupta.

O gradiente hidráulico variou de acordo com a coleta em cada registro. A Figura 19, apresenta um esquema contendo as alturas que propiciaram a obtenção

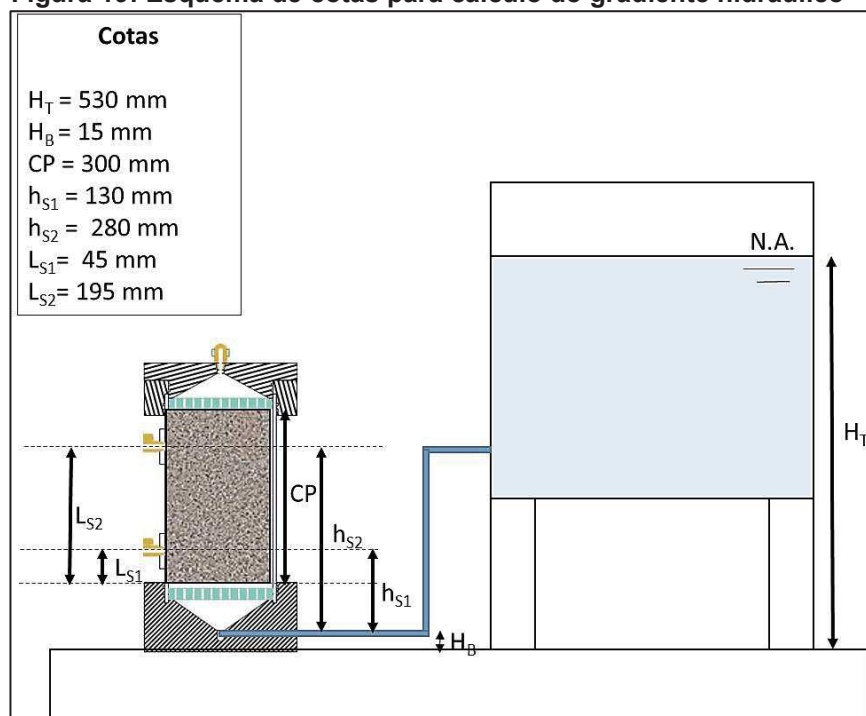
desses valores com auxílio de parte da Equação 2 (item 2.2.2). Sendo eles, 8,53 e 1,20 para o registro superior e inferior, respectivamente.

Figura 18: Detalhe da boia para manter o nível do reservatório constante



Fonte: Acervo do autor, 2018.

Figura 19: Esquema de cotas para cálculo do gradiente hidráulico



Fonte: Autor, 2018.

A calibração do sistema consistiu na obtenção de uma vazão de saída do registro de distribuição para as colunas de colmatação. Para esse trabalho utilizou-se uma vazão média de 0,00321 L/s. Esse valor foi definido a partir de sugestões de pesquisadores locais. Para a obtenção da vazão de alimentação das colunas de colmatação utilizou-se uma proveta graduada de 250 mL e cronômetro, calibrando-se a vazão.

As colunas de colmatação foram montadas de forma semelhante ao procedimento descrito para a montagem do corpo de prova no ensaio de permeabilidade (item 3.2.6). No entanto, em sua montagem, foi possível que cada coluna de colmatação fosse acoplada ao peneirador mecânico, impondo-lhe vibração.

O material de constituição das colunas foi disposto em camadas, montadas com o auxílio de um funil, distribuindo em forma de espiral do centro do molde para as bordas, atingindo uma espessura de 2 cm cada camada, a fim de completar o equipamento com o material (Figura 20). A compactidade relativa atingida no presente trabalho foi de 77,87% em ambas as colunas de colmatação.

Figura 20: Coluna de colmatação, com detalhe para amostra compactada



Fonte: Acervo do autor, 2018.

Para evitar que o material passasse pelos registros do permeâmetro foi colocado uma tela de poliéster de 150 fios/cm na parte interna, protegendo o registro

e evitando que o material fosse carregado, uma vez que o orifício interno do registro possui um diâmetro de 5 mm.

Para evitar que o material passasse pelos registros do permeâmetro foi colocado uma tela de poliéster de 150 fios/cm na parte interna, protegendo o registro e evitando que o material fosse carregado, uma vez que o orifício interno do registro possui um diâmetro de 5 mm.

3.4 ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICA E MICROBIOLÓGICA

As análises físico-química e microbiológicas foram todas realizadas em triplicata, no laboratório de Microbiologia do curso de Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia da UTFPR-TD. A realização das triplicatas consistiu em realizar cada experimento ou teste, três vezes, para que desta forma, fosse possível um compromisso aceitável entre a precisão e o trabalho.

As amostragens ocorreram alternando-se os registros de coleta nas colunas de colmatação, sendo uma vez coletado no registro inferior e a seguinte no superior e assim sucessivamente a cada 15 dias em um período de avaliação de 60 dias. As coletas ocorreram de forma simétrica e simultânea, ou seja, quando se coletava nos registros inferiores, fazia-se isto, em ambas as colunas de colmatação e o mesmo ocorria para coletas nos registros superiores. Quando se iniciava um ciclo de análise, no registro inferior, por exemplo, realizavam-se as coletas para o início deste ciclo e após decorrido o intervalo de 15 dias uma nova coleta era efetuada para concluir as análises no atual registro, para então, dar início a um novo ciclo no registro superior.

3.4.1 Condutividade elétrica

O acompanhamento do parâmetro de condutividade elétrica foi realizado utilizando-se um condutivímetro, capaz de aferir a capacidade da água em transmitir

corrente elétrica. O procedimento de medida da condutividade elétrica foi realizado também no laboratório de Saneamento do Departamento de Engenharia Civil da UTFPR-TD.

3.4.2 Potencial Hidrogeniônico (pH)

Durante o período de ensaio de análise de colmatação, houve o acompanhamento de alguns parâmetros físico-químicos da água utilizada no processo, para melhor compreensão do processo de colmatação, isso por que esses parâmetros podem apresentar uma grande variabilidade com o tempo. O pH foi medido quinzenalmente no laboratório de Saneamento do Departamento de Engenharia Civil da UTFPR-TD, com auxílio de um medidor de pH de bancada.

3.4.3 Temperatura

A temperatura do sistema foi medida diretamente nos reservatórios do sistema, com auxílio de um termômetro e conferida com o equipamento de medida de condutividade elétrica.

3.4.4 Turbidez

No decorrer dos experimentos também houve a avaliação da turbidez, a qual representa o grau de alteração da passagem de luz através da amostra de água. O padrão de turbidez foi medido com as mesmas amostras utilizadas para as análises de pH e condutividade elétrica.

3.4.5 Sólidos Totais e Sólidos Fixos

Para o ensaio de sólidos totais e fixos seguiu-se a norma NTS 013 (SABESP, 1999). Primeiramente, lavou-se as cápsulas de porcelana esmaltada com capacidade de 130ml, com água destilada e álcool 70%, secou-se e calcinou-as em forno-mufla a 550 °C por uma hora. Este procedimento foi realizado visando eliminar qualquer impureza para não afetar os resultados. Posteriormente, as cápsulas foram transferidas para um dessecador até que as mesmas pudessem esfriar até temperatura ambiente e em seguida fossem pesadas.

As amostras de água das colunas foram coletadas em béqueres e cada uma foi bem homogeneizada com o auxílio de uma baqueta. Uma alíquota da amostra com um volume determinado de 100 mL foi transferida para a cápsula. Então, as amostras foram levadas para a evaporação (Figura 21a) em estufa (105 ± 2 °C) até peso constante, posteriormente retiradas, colocadas em dessecador até temperatura ambiente (Figura 21b) e novamente pesadas.

Figura 21: Cápsulas em estufa para evaporação (a); Cápsulas em dessecador para atingir a temperatura ambiente (b)



Fonte: Acervo do autor, 2018.

Realizada a etapa anterior procedeu-se a calcinação, a qual consistiu em inserir as cápsulas mais uma vez no forno-mufla (550 ± 50 °C) por 30 (trinta minutos). Decorrido o tempo, estas foram transferidas para um dessecador até que

as mesmas atingissem a temperatura ambiente e procedeu-se à pesagem. Após o procedimento supracitado e com o auxílio das Equações 11 e 12, foi possível expressar os resultados de sólidos totais e sólidos fixos em mg/L.

$$\text{Sólidos Totais} = \frac{P_2 - P_1}{\text{vol. am.}} \cdot 1.000.000 \quad (11)$$

$$\text{Sólidos Fixos} = \frac{P_3 - P_1}{\text{vol. am.}} \cdot 1.000.000 \quad (12)$$

Sendo: P_1 = Tara da cápsula, em g;

P_2 = Cápsula com amostra após secagem, em g;

P_3 = Cápsula com amostra após calcinação, em g;

vol. am. = Volume da amostra (mL).

3.4.6 Análise microbiológica de unidades formadoras de colônias (UFC)

A análise microbiológica teve como objetivo quantificar as unidades formadoras de colônias, pois os microrganismos como referenciado acima podem ser responsáveis pelo processo de colmatção biológica e ainda colaborar para os demais processos colmatativos. As análises foram realizadas no Laboratório de Microbiologia do curso de Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia da UTFPR-TD.

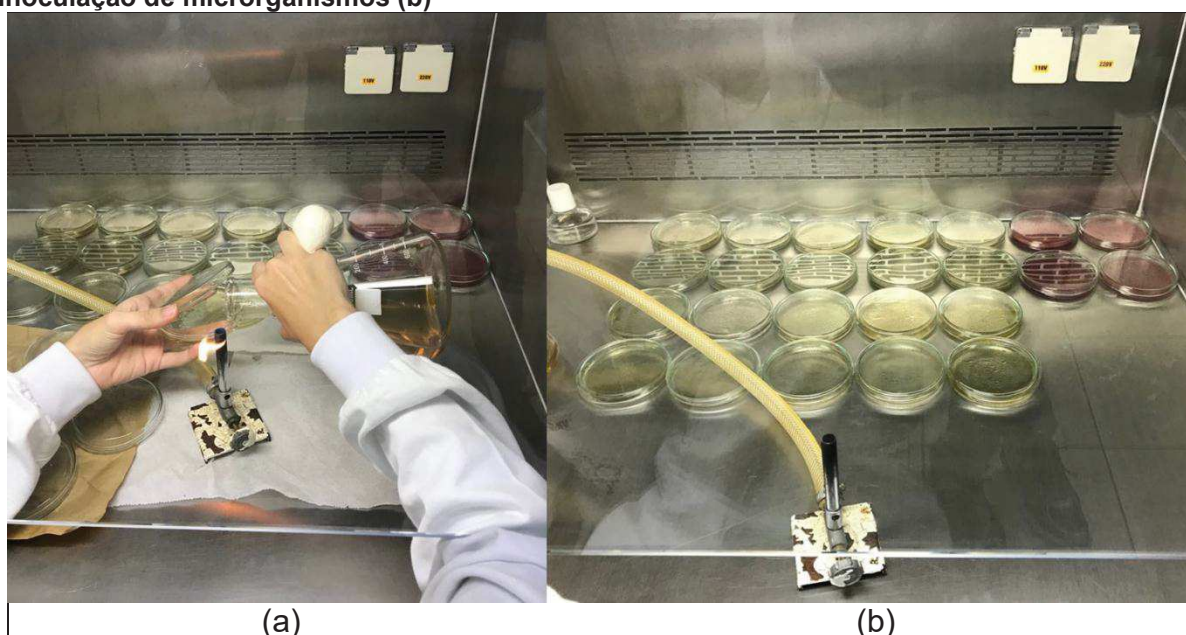
A técnica escolhida foi a contagem padrão em placa de Petri, recomendada pelo *Standart Methods for the Examination of Water and Wasterwater* (1998). Procedeu-se à contagem bacteriana inoculando-se pequenas alíquotas pré-determinada (0,1 µL) da água a ser analisada em placa de Petri utilizando-se meio de cultura YEA (Ágar Extrato de Levedura). Esse método proporciona a capacidade de se obter o número de microrganismos viáveis na alíquota de água do sistema analisado, ao utilizar um meio de cultivo rico e não seletivo (PICANÇO, 2002). A

contagem microbiana foi realizada através de diluições diretas a partir das amostras líquidas utilizando-se água estéril.

a. Preparação do meio de cultivo

O meio de cultura utilizado foi constituído por (g/L): Extrato de Levedura (3); peptona (5); ágar (15). Para a sua formulação adicionou-se os componentes do meio em água destilada, homogeneizando a solução e aquecendo até a fervura. Em seguida, a mesma foi colocada em um Erlenmeyer vedado com uma rolha feita de algodão envolvida por gaze e levado para autoclave a 121 °C, 1atm, por 30 (trinta) minutos, para esterilização. Decorrido o tempo, retirou-se da autoclave o material e aguardou-se o resfriamento do mesmo. Em seguida, na câmara de fluxo laminar vertical verteu-se alíquotas de 20 ml, aproximadamente, nas placas de Petri, aguardando solidificação do meio, para que as mesmas pudessem ser utilizadas nos experimentos (Figura 22).

Figura 22: Procedimento de montagem da placa de petri (a); placas de petri prontas para a inoculação de microrganismos (b)

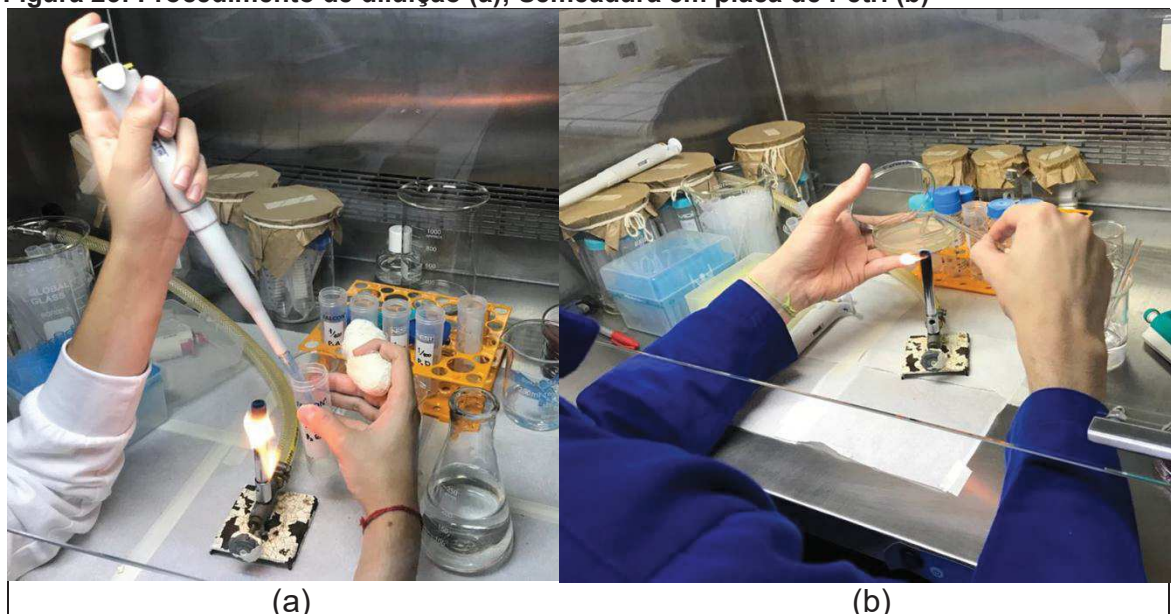


Fonte: Acervo do autor, 2018.

b. Semeadura e inoculação em placa de Petri

Com as amostras já coletada para os experimentos, alíquotas de 0,1 μL das amostras de água foram diluídas de forma estéril, contendo 0,9 μL de água estéril, obtendo assim, a primeira diluição (10^{-1}). A partir desta diluição, efetuou-se as demais diluições com água estéril, obtendo-se diluições de 10^{-2} e 10^{-3} (Figura 23a)

Figura 23: Procedimento de diluição (a); Semeadura em placa de Petri (b)



Fonte: Acervo do autor, 2018.

Diluídas as amostras, inoculou o volume de 0,1 μL , em triplicata, de cada diluição nas placas de Petri. Em seguida, com o auxílio de uma alça de *Drigalski* espalhou-se o material sob o meio de cultivo de forma uniforme (Figura 23b). As placas foram então incubadas em estufa bacteriológica durante um período de 48 horas a temperatura de 37 °C. Os micro-organismos que se desenvolveram nessas condições foram capazes de formar colônias e serem contadas. Desta forma, o valor final de concentração celular será obtido calculando-se a média de todas as contagens fornecidas.

A contagem dos microrganismos em cada placa de Petri foi efetuada contando-se o número de unidades formadoras de colônias (UFC/mL) de acordo com a Equação 13.

$$\text{UFC/ml} = \frac{\text{Colônias contadas}}{\text{Volume de amostra na placa}} \quad (13)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA

Os ensaios de caracterização da amostra foram elaborados de acordo com a metodologia descrita no item 3.2.

4.1.1 Granulometria

Os resultados da granulometria estão contemplados na Tabela 2, assim como a dimensão máxima característica (D.M.C.) e o módulo de finura (M.F.).

Tabela 2: Composição granulométrica, dimensão máxima característica e módulo de finura

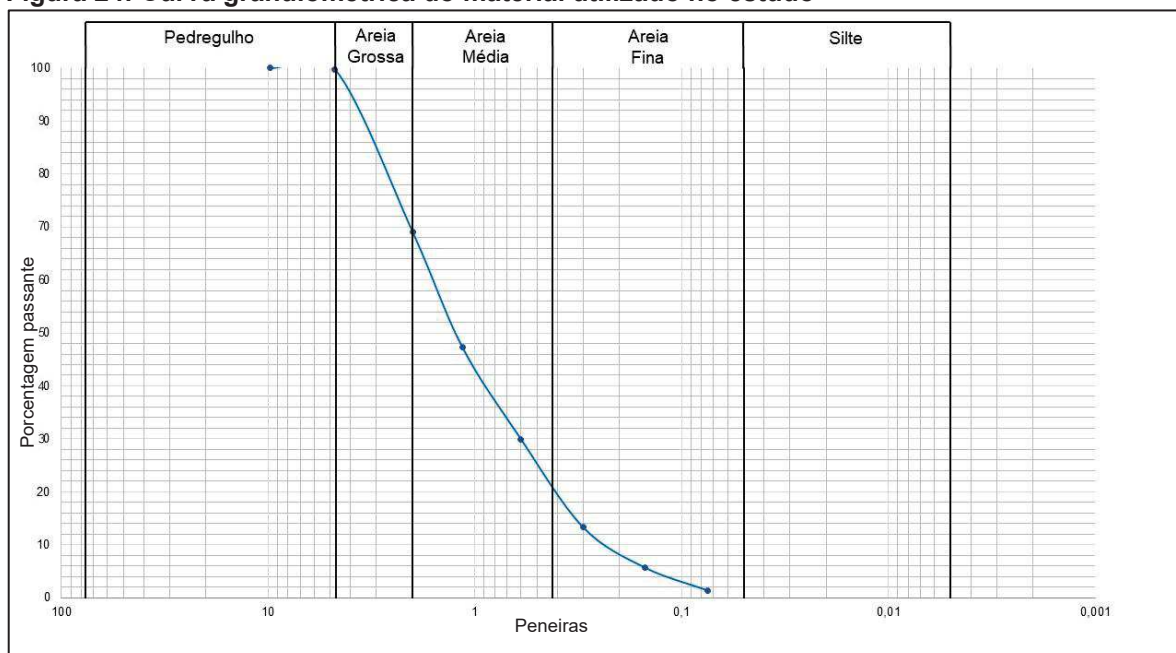
Peneiras # (mm)	Nº Peneiras	Amostra	∑% Retida	Peso Passante	∑% Passante
9,75	3/8"	0,00	0,00	865,2	100,00
4,75	4 ou 3/16"	3,40	0,39	861,8	99,61
2,36	8	266,50	31,20	595,3	68,80
1,18	16	212,20	55,72	383,1	44,28
0,6	30	149,10	72,95	234,0	27,05
0,3	50	125,00	87,40	109,0	12,60
0,15	100	62,00	94,57	47,0	5,43
0,075	200	35,90	98,72	11,1	1,28
Fundo		11,10	100,00	-	-
Peso Seco				865,2	
Módulo de Finura (M.F.)				3,42	
Dimensão Máxima Característica (D.M.C.)				4,75	

Fonte: Autor, 2018.

É possível analisar na Tabela 2 que a porcentagem de finos passantes pela peneira de número 200 (duzentos) foi de 1,28%, o que corrobora com a dimensão máxima característica (D.M.C.) da amostra obtida, a qual foi inferior a abertura da peneira solicitada (3/8"). A curva granulométrica do material estudado (Figura 24), apresenta uma porcentagem de material passante pela peneira de número 4, superior a 90 % da amostra, de modo que a fração de agregado miúdo é dominante no material de estudo (ABNT,2009). No entanto, nota-se a presença de fração ainda

de grãos levemente maiores, definidos como as porções finais do agregado graúdo – pedrisco- (BRASIL,2009).

Figura 24: Curva granulométrica do material utilizado no estudo



Fonte: Autor, 2018.

4.1.2 Massa unitária, específica e específica aparente

A massa unitária de um agregado serve como parâmetro de classificação de um agregado quanto sua densidade. O ensaio seguiu o procedimento metodológico descrito nos itens 3.2.2 e 3.2.3 e os resultados estão apresentando na Tabela 3.

Tabela 3: Massa unitária da areia de basalto

	Solto		Compactado	
	Massa do Recipiente + Amostra (kg)	ρ_{ap} (kg/m ³)	Massa do Recipiente + Amostra (kg)	ρ_{ap} (kg/m ³)
	27,552	1633,17	30,064	1801,81
	27,556	1633,44	30,074	1802,48
	27,564	1633,98	30,078	1802,75
Médias das Medidas	27,557	1633,53	30,072	1802,34
Medidas em (g/cm³)		1,63		1,80

Fonte: Autor, 2018.

Ainda com relação à caracterização da amostra, a Tabela 4 apresenta os resultados da massa específica e massa específica aparente, em condição saturada superfície seca (sss).

Tabela 4: Massa específica do agregado e massa específica aparente

Massa do Picnômetro + água + amostra (g)	Massa do Frasco + agregado (sss)	Volume de água adicionada ao frasco (cm³)	Massa específica do agregado (SSS) (g/cm³)	Massa específica aparente (g/cm³)
1131,82	806,83	324,99	2,98	2,86
1166,36	838,06	328,3	2,99	2,91
1097,76	771,09	326,67	2,99	2,89
Média das Medidas (g/cm³)			2,99	2,89

Fonte: Autor, 2018.

De acordo com as Tabelas 3 e 4, observa-se valores de massa unitária no estado solto na ordem de 1,630 g/cm³ e massa específica aparente na condição saturada superfície seca sendo 2,990 g/cm³. Estes valores são similares aos reportados por Evangelista (2013), o qual encontrou valores de 1,606 g/cm³ e 2,950 g/cm³, para massa unitária no estado solto e massa específica aparente na condição saturada superfície seca, respectivamente, quando da caracterização de amostras de areia artificial produzidas também, a partir de rochas basálticas e proveniente da região sudoeste do Paraná.

4.1.3 Índice de forma

A análise morfoscópica refere-se ao estudo das propriedades (forma, esfericidade e arredondamento), estas propriedades são ferramentas importantes para o conhecimento de processos responsáveis pelo transporte dos grãos, por exemplo.

A amostra ensaiada apresentou uma porcentagem de cada tipo de classificação de acordo com a metodologia proposta por Power (1953), a qual está apresentada na Tabela 5. Com o auxílio do microscópio portátil, foi possível realizar registros de cada parte analisada, bem como atribuir códigos de modo a facilitar a

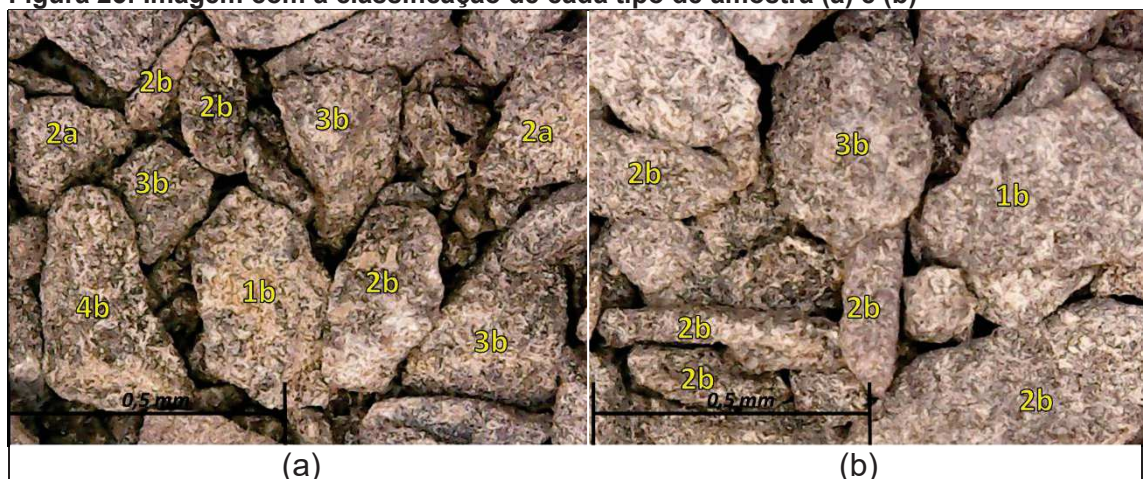
realização das análises (Figura 25). No total foram analisadas mais de 30 fotos. Ainda com relação a Tabela 5, verifica-se que os dados obtidos em diferentes pontos da amostragem total, apresentaram uma predominância de grão angulosos (45%) e subangular (22%).

Tabela 5: Índice de forma da areia de basalto

Amostragem 0,600kg	Índice de forma	
	a Alta Esfericidade	b Baixa Esfericidade
1 Muito angular	2%	1%
2 Angular	1%	45%
3 Subangular	4%	22%
4 Subarredado	6%	13%
5 Arredondado	3%	2%
6 Muito arredondado	1%	1%

Fonte: Autor, 2018.

Figura 25: Imagem com a classificação de cada tipo de amostra (a) e (b)



Fonte: Acervo do autor, 2018.

4.1.4 Índice de vazios máximo e mínimo

Seguindo a metodologia proposta no item 3.2.5, obteve-se os valores de índice de vazios máximo e mínimo que estão contemplados na Tabela 6.

Tabela 6: Índice de vazios máximo e mínimo

Índice de vazios máximo ($e_{máx.}$)	0,85
Índice de vazios mínimo ($e_{mín.}$)	0,47

Fonte: Autor, 2018.

4.1.5 Ensaio de permeabilidade

Após a caracterização da areia artificial passou-se para a realização do ensaio de permeabilidade. Porém, como mencionado nos materiais e métodos (item 3.2.6), devido a limitações em nossos laboratórios foram necessárias algumas adaptações, a saber:

- 1) Quanto a aplicação do vácuo no sistema, não foi possível atingir às pressões solicitadas pela norma no corpo de prova. Fato este que foi visualizado devido ao refluxo de água nas mangueiras que ligavam o equipamento a bomba, o que pode ter colaborado no resultado obtido;
- 2) Também para o processo de saturação não foi possível desaerar a água, o que pode ocasionar microbolhas que afetam o corpo de prova, comprometendo o fluxo e conseqüentemente influenciar os resultados;
- 3) Devido ao fato de adaptarmos o equipamento com um tubo de PVC ocre, o qual não é constituído por um material transparente, não foi possível a visualização se o fluxo de água criou um caminho preferencial, ou até mesmo, se haviam bolhas de ar que dificultassem o fluxo. Além disso, esta alteração também pode ter comprometido a estanqueidade do equipamento, pois observou-se vazamento na ligação entre o tubo e a base, como supracitado.

De acordo com o resultado obtido no ensaio, o qual permaneceu com coeficiente de permeabilidade 10^{-3} cm/s, valor este que se distancia do reportado na literatura consultada (10^{-2} cm/s) (ITAIPIU, 1991, p. 19). Contudo, o resultado do ensaio ainda se enquadra dentro dos parâmetros, apresentados no item Revisão Bibliográfica (Tabela 1), conforme reportado por Pinto (2006).

4.2 ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS E MICROBIOLÓGICA

Análises físico-químicas da água utilizada no sistema anterior a sua inserção nos reservatórios foi caracterizada conforme ilustra a Tabela 7.

Tabela 7: Análise inicial da água utilizada no sistema

	Dia	Potencial Hidrogeniônico (pH)	Condutividade Elétrica ($\mu\text{S/cm}$)	Turbidez (NTU)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
Coleta	21/fev.	6,87	51,22	896	23

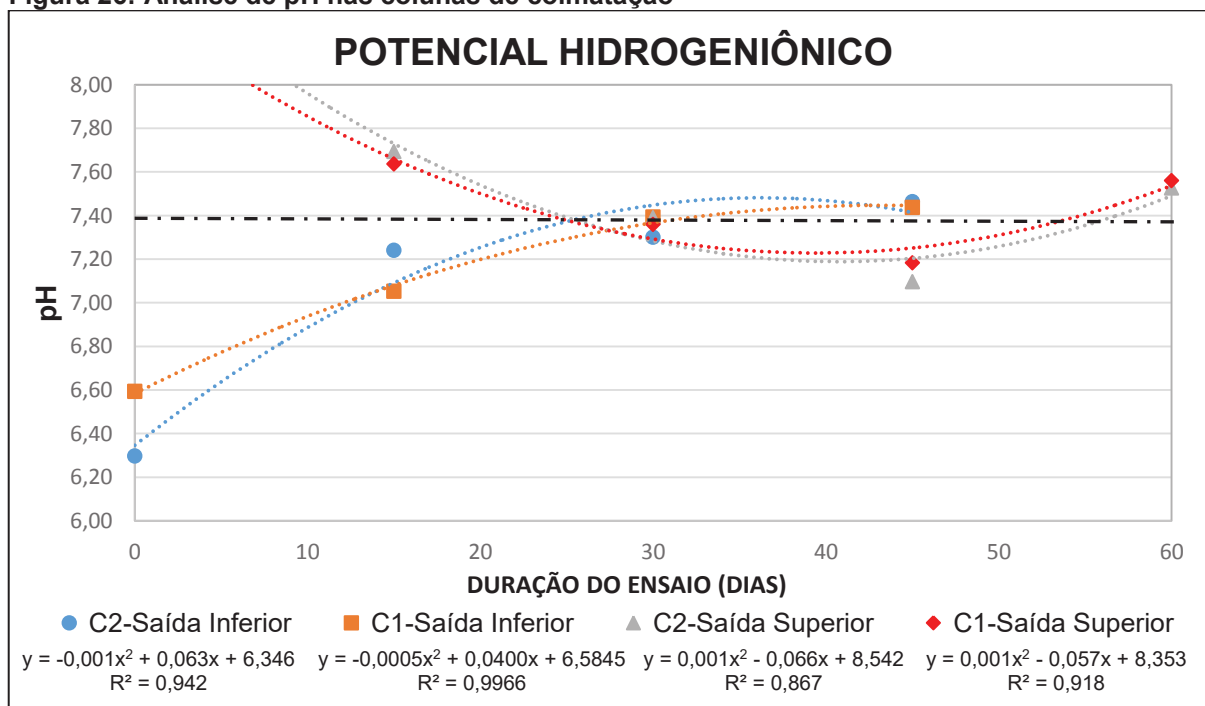
Fonte: Autor, 2018.

4.2.1 Potencial hidrogeniônico (pH), condutividade elétrica, turbidez, temperatura e vazão

Estes parâmetros, foram mensurados de acordo com as metodologias descritas nos itens 3.4.1, 3.4.2, 3.4.3 e 3.4.4,

As leituras de potencial hidrogeniônico apresentaram valores iniciais diferenciados para os registros superiores e inferiores (Figura 26). Este fenômeno pode estar correlacionado ao tempo de exposição entre a areia de basalto britado e a água de alimentação. O ensaio iniciou-se pelo registro inferior onde se dispôs o primeiro contato com o material da coluna, com pH inicial médio de 6,4 em ambas as colunas. Após 15 dias, fechou-se o registro inferior para a abertura do superior, no entanto o corpo de prova já havia sido parcialmente saturado via capilaridade e vácuo intencionalmente criado pelo sistema ($\text{pH}_{\text{médio}} = 7,4$). Após 30 dias de ensaio, ambas as saídas das colunas convergiram seus valores para a faixa de neutralidade.

Figura 26: Análise de pH nas colunas de colmatação

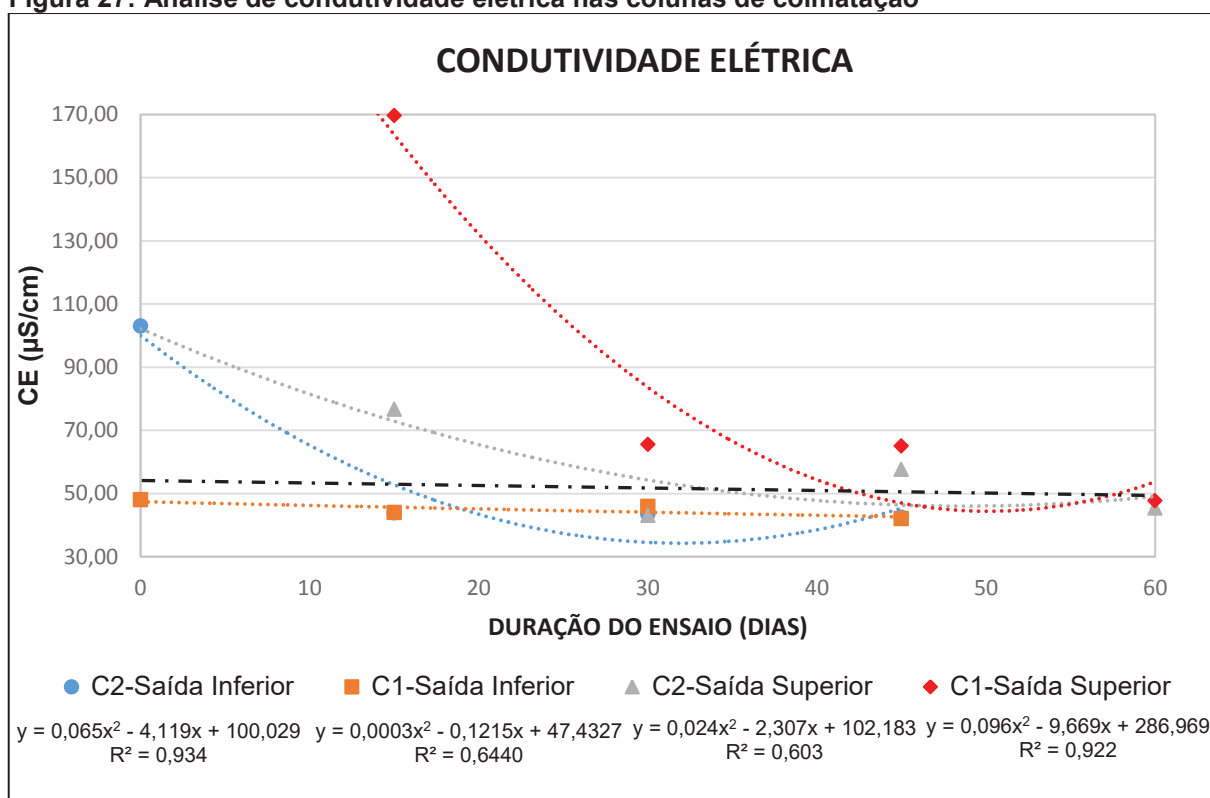


Fonte: Autor, 2018.

Isto pode estar relacionado a uma estabilização do sistema de ensaio, uma vez que a concentração de íons hidrogênio (H⁺) pode ter sido alterada devido a reações químicas entre a água e o material, já que, este padrão relaciona-se a concentração de íons presentes na amostra (CARVALHO, 2010).

Quanto as análises de condutividade elétrica, estas apresentaram valores iniciais distintos para ambos os registros, sendo eles: entre 48 e 103 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para as saídas inferiores das colunas; e entre 76 - 169 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para os superiores (Figura 27). Também, ao decorrer do ensaio notou-se uma convergência demonstrada a partir dos trinta dias, com valores variando entre 40 e 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$, o que corrobora com o valor encontrado quando analisada a água de abastecimento do sistema 51,22 $\mu\text{S}/\text{cm}$, antes ao início do ensaio (Tabela 7).

Figura 27: Análise de condutividade elétrica nas colunas de colmatação



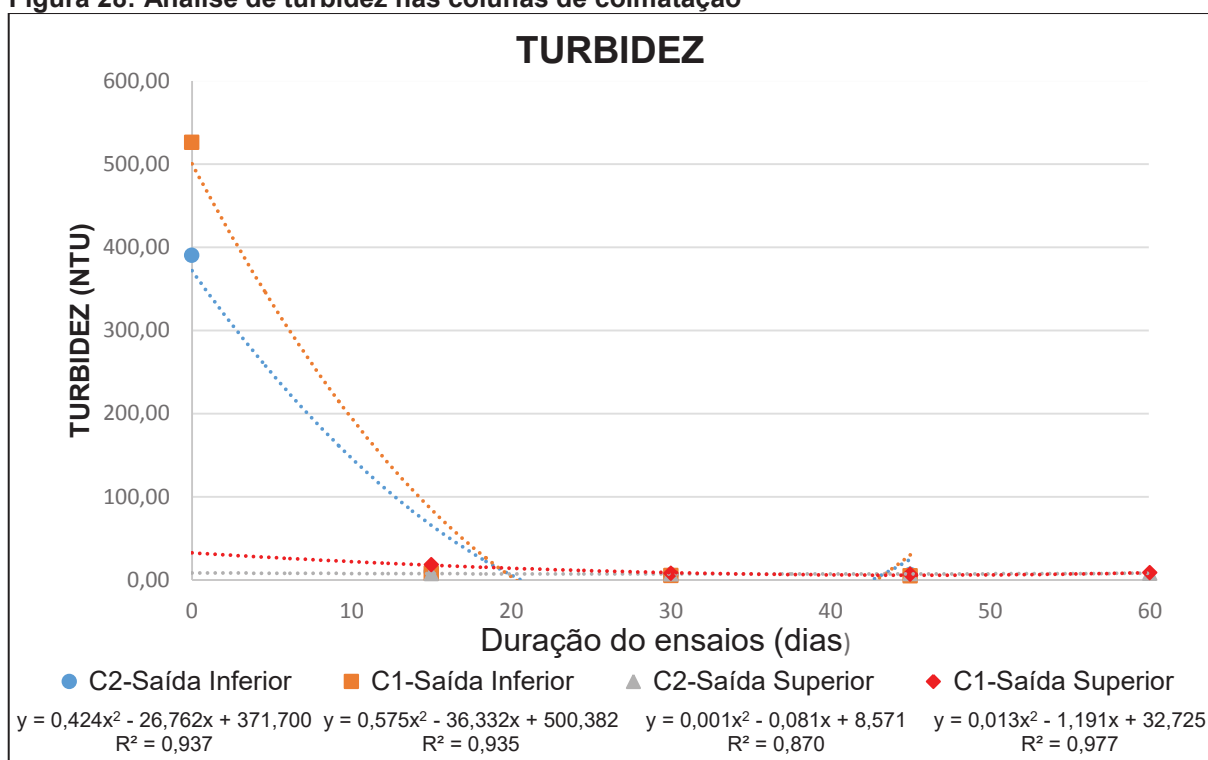
Fonte: Autor, 2018.

A possível estabilização do sistema pode estar correlacionada as reações químicas que ocorreram entre a água e o material das colunas, o que pode ter ocasionado o equilíbrio da concentração de íons dissolvidos na amostra. Uma vez que a condutividade elétrica é definida pela capacidade de uma solução aquosa de

conduzir corrente elétrica, devido a presença de íons dissolvidos e sua capacidade de mobilidade (CARVALHO, 2010).

O padrão de turbidez este apresentou comportamento similar aos de pH e condutividade elétrica. Valores mais elevados foram observados no início do ensaio: 390 e 526 NTU nos registros inferiores e 7,6 e 18 NTU nos registros superiores (Figura 28). Isso deve-se ao fato de o experimento ter sido iniciado pelo registro inferior, o que provavelmente proporcionou que o material fino, presente nas colunas, fosse expelido elevando o padrão de turbidez. Já após decorridos os 15 dias iniciais de ensaio, quando foi aberto os registros superiores, as amostras coletadas apresentaram aparência mais límpida o que é comprovada com os padrões de leitura inferiores.

Figura 28: Análise de turbidez nas colunas de colmatação

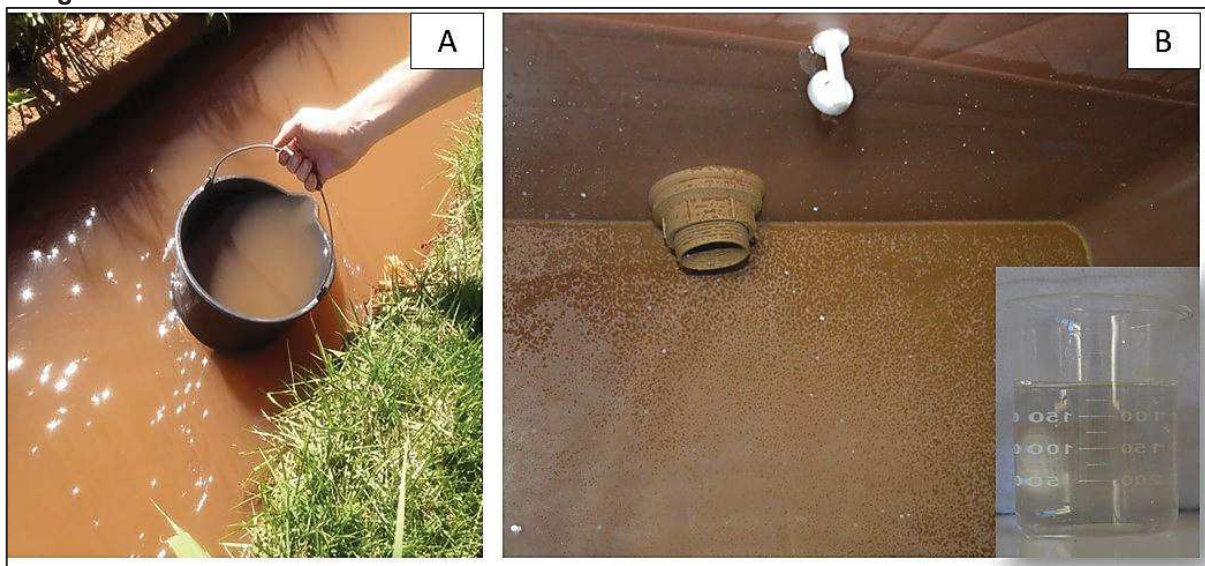


Fonte: Autor, 2018.

Também, ao longo do experimento, observou-se uma aparência mais cristalina da água, que pode ser evidenciada pelos valores baixos apresentados ao longo dos sessenta dias, Figura 28. As colunas podem ter funcionado como um filtro, deixando a água com uma aparência mais cristalina e/ou os sedimentos foram decantados durante o ensaio. Na Figura 29 observa-se o aspecto da colocação da água de alimentação do sistema, no momento da coleta nas canaletas (Figura 29A)

e no final do ensaio (Figura 29B). Ao final do ensaio é possível visualizar a deposição de sedimentos no fundo do reservatório e a transparência da água.

Figura 29: Aspecto da água do sistema. (A) Coloração turva de água no momento da coleta. (B) Deposição de sedimento do fundo do reservatório superior, com detalhe para a transparência da água ao final do estudo.



Fonte: Acervo do autor, 2018.

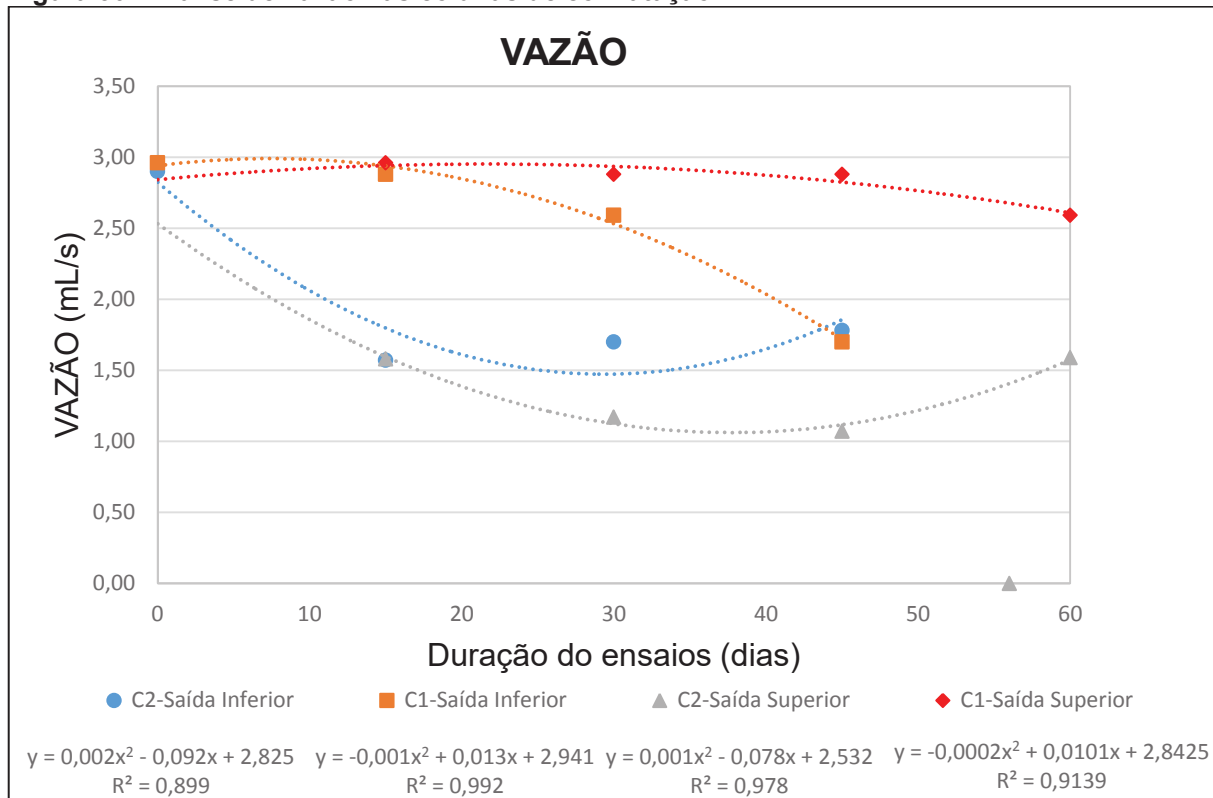
Sobre a vazão, o sistema foi calibrado para a alimentação de 0,00321 L/s. No entanto, as colunas diferenciaram entre si. A coluna 1 apresentou uma similaridade entre os registros de saída, ambos apresentaram uma redução em relação a vazão de calibração.

Já a coluna 2 também apresentou um valor próximo entre os registros, no entanto a redução em relação a vazão de calibração foi maior, sendo que, o registro superior não apresentou fluxo aos 55 dias, reestabelecendo a vazão de 0,00159 L/s (Figura 30). Tal comportamento pode estar relacionado a formação de vácuo, como já supracitado, bem como pela presença de microbolhas de ar na coluna. Também foi perceptível, o expurgo das microbolhas aos sessenta dias, o que proporcionou o retorno de fluxo no registro.

A Figura 31 exibe a variação da temperatura do reservatório superior no decorrer das semanas de realização do experimento. De acordo com esta figura, é possível perceber que a máxima temperatura alcançada foi de 27,9 °C, atingindo uma amplitude térmica máxima de 4,9 °C. De acordo com a literatura esta temperatura (27,9°C) pode ser considerada inferior à temperatura considerada como ótima para o crescimento de microrganismos (MANDIGAN, MARTINKO, PARKER,

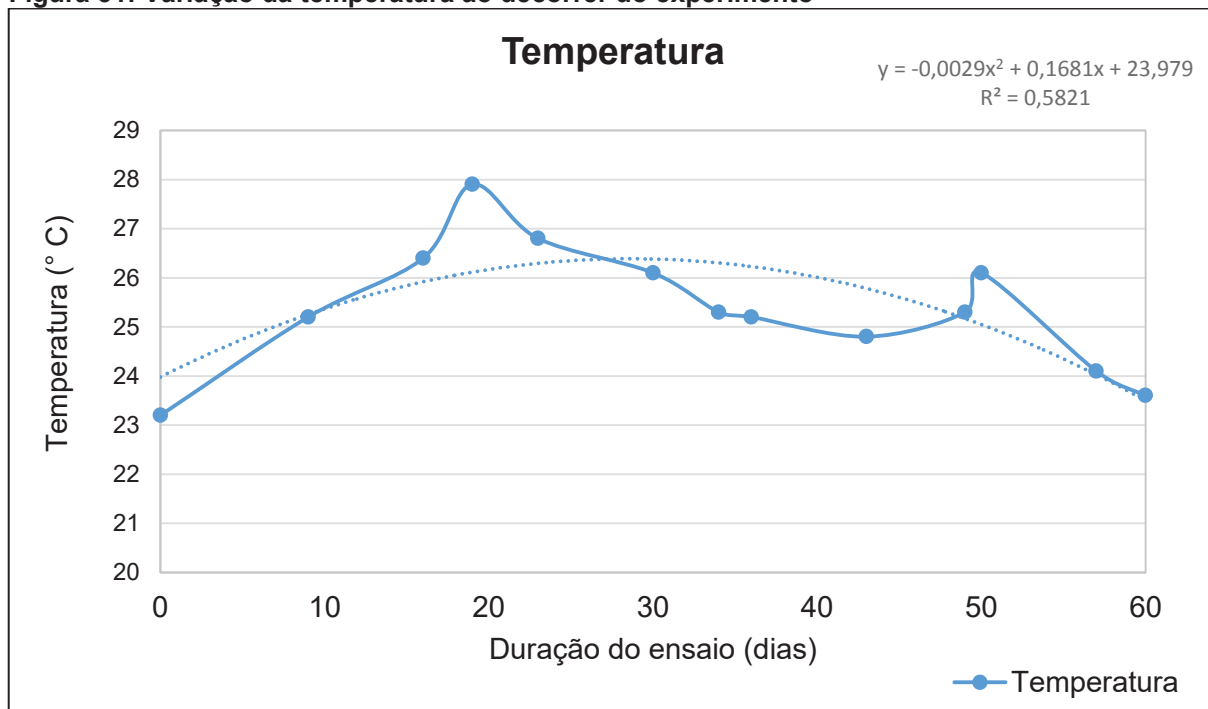
2008), a microbiota manteve-se ativa durante o período de ensaio, como será discutida no item 4.2.3.

Figura 30: Análise de vazão nas colunas de colmatação



Fonte: Autor, 2018.

Figura 31: Variação da temperatura ao decorrer do experimento



Fonte: Autor, 2018.

4.2.2 Sólidos fixos e totais

O ensaio foi realizado uma única vez por registro, ou seja, diferentemente das demais análises que foram realizadas no início e fim de cada ciclo em cada registro, este foi realizado apenas no início de cada ciclo. Considerando que o processo de pesagem foi efetuado por vários dias consecutivos, de maneira a assegurar uma constância de peso, usou-se uma balança com precisão de 0,001 g, o que garantiu um compromisso aceitável entre a precisão e o trabalho.

A Tabela 8 apresenta os resultados obtidos com o experimento. Nota-se nesta Tabela que há uma possível tendência na redução da presença de sólidos nas amostras, resultados estes que corroboram com os obtidos por Frazão (2013) e CONAMA N° 357/2005 (valores para sólidos totais <500mg/L).

Tabela 8: Sólidos fixos e totais

Coletas	Permeâmetro 1		Permeâmetro 2	
	Sólidos Totais (mg/L)	Sólidos Fixos (mg/L)	Sólidos Totais (mg/L)	Sólidos Fixos (mg/L)
Registro Inferior	161,611	113,296	183,274	159,947
Registro Inferior	34,153	23,324	84,946	76,617
Registro Superior	212,167	149,960	318,264	229,950
Registro Superior	127,468	76,647	109,986	73,325

Fonte: Acervo do autor, 2018.

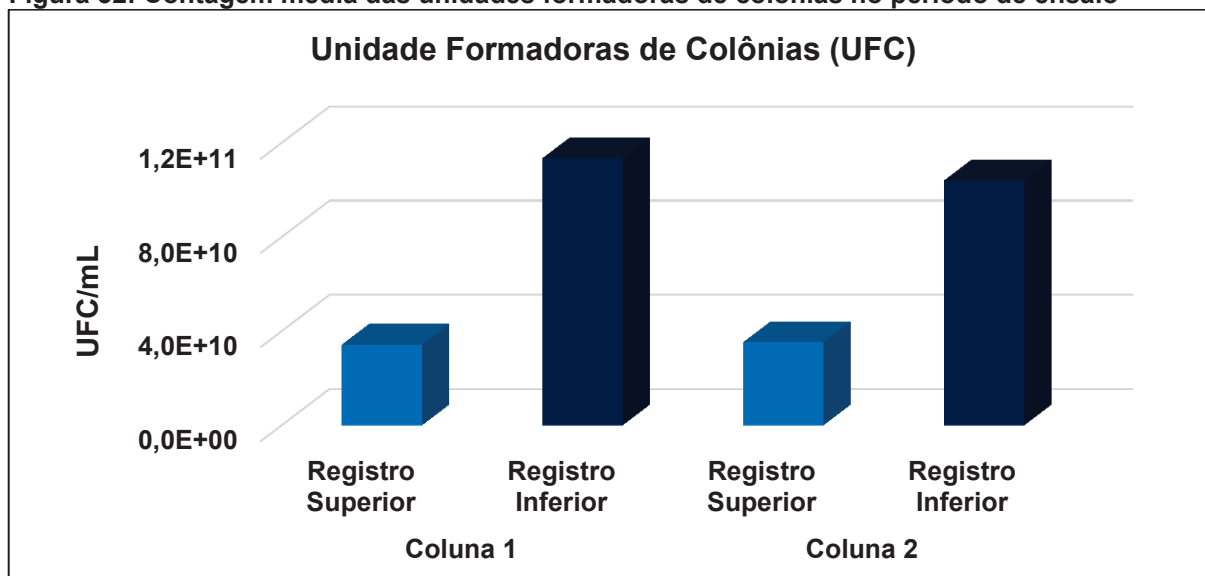
4.2.3 Contagem de bactérias e análise microbiológica

A contagem de bactérias mostrou-se uma ferramenta útil durante a pesquisa, uma vez que se tornou possível avaliar o crescimento das bactérias presente na água do sistema avaliado. Essa contagem teve como função subsidiar a compreensão dos fatores bióticos, para o desenvolvimento de microrganismos que podem influenciar em processos colmatativos.

A Figura 32 apresenta os valores médios das unidades formadoras de colônias. Verifica-se nesta figura que as UFCs apresentaram maiores valores nos registros inferiores independentemente da coluna avaliada em relação aos valores

obtidos nos registros superiores. Nota-se ainda mesmo comportamento para valores comparados entre os registros, ou seja, para uma mesma posição de registro, em diferentes colunas, valores de UFCs foram similares.

Figura 32: Contagem média das unidades formadoras de colônias no período de ensaio

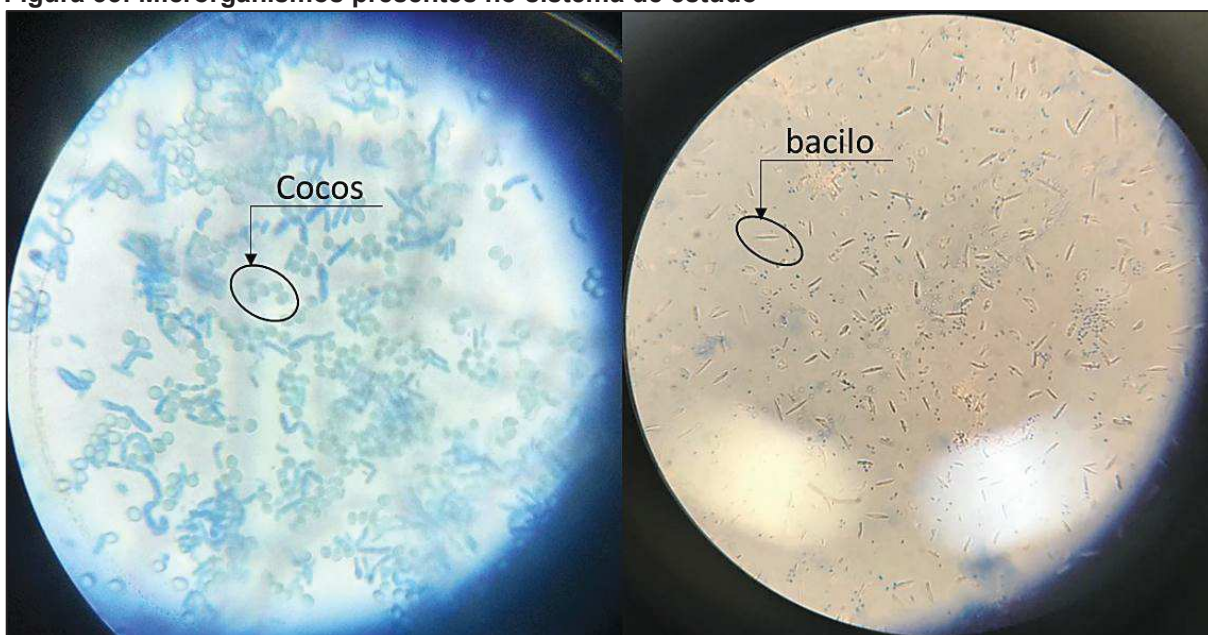


Fonte: Autor, 2018.

Quanto ao estudo dos microrganismos, o presente trabalho, não objetivou a identificação das espécies. Contudo, análises microscópicas foram realizadas (Figura 33), as quais permitiram a observação de bactérias presentes no sistema de estudo. Ainda é válido ressaltar, que durante os sessenta dias de ensaio não houve a troca da água de alimentação do sistema, o que corrobora com a presença de nutrientes para o desenvolvimento microbiano.

As análises foram realizadas em microscópio, com auxílio de corante azul de metileno e foi possível observar a presença de duas morfologias diferentes, sendo elas cocos e bacilos. De acordo com a literatura, estes microrganismos reproduzem-se de maneira acelerada quando o ambiente possui condições favoráveis (MANDIGAN, MARTINKO, PARKER, 2008). Segundo Cullimore (1978) e Baveye *et al.* (1998), bactérias com estes formatos auxiliam em processos colmatativos de filtros, tanto em compostos com materiais granulares como em materiais sintéticos.

Figura 33: Microrganismos presentes no sistema de estudo



Fonte: Acervo do autor, 2018.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho conseguiu atingir o objetivo de montar o sistema operacional de investigação de processos de colmatação de filtros de barragens de terra. No entanto, devido ao curto período de análise não foi possível obter resultados significativos sobre indícios ou não do fenômeno colmatativo.

O estudo permitiu algumas conclusões importante sobre a montagem do sistema, já que o ensaio é uma adaptação da NBR 13292/1995. São essas:

- A compactação da areia deve ser realizada com a amostra úmida. Este ensaio foi realizado com amostra seca e a vibração promoveu a segregação dos finos, que se depositaram sobre os grãos maiores;

- Nas primeiras horas do ensaio ocorreram a lavagem do material fino presente na coluna, junto com a saturação do corpo-de-prova. Isso foi comprovado com os primeiros testes de turbidez e de sólidos totais. Logo, o fenômeno da colmatação deve ser analisado após estabilização dos sistemas como um todo, já que foi projetado para recirculação de água;

- A saturação ocorreu por gravidade, no entanto, a presença de bolhas de ar que interferem no regime de percolação, podem promover um caminho preferencial de percolação ou, até mesmo, um vácuo que compromete a vazão de água. O vácuo foi percebido pela redução de vazão no registro superior da coluna 2, enquanto se visualizada as bolhas de ar. Quando essas se dissiparam no sistema, o referido registro voltou a apresentar vazão. A interferência do ar pode ser eliminada se aplicado a bomba de vácuo. No entanto, a disponibilidade de oxigênio é importante para o desenvolvimento microbiano.

- A montagem e a elaboração do sistema foram adequadas para um estudo piloto. A partir disso, pode-se aprimorar o número de ensaios e coletas a serem realizadas para um estudo em larga escala. Especialmente sobre o tempo de estabilização, as análises relacionadas ao fenômeno de colmatação podem ser melhor interpretadas a partir dos trinta dias de ensaio. Antes disso, é o tempo em que o sistema necessita para um equilíbrio entre a água de percolação e o material geotécnico do filtro;

- Quanto ao comportamento da colmatação do material, o tempo do experimento foi curto para que pudéssemos apresentar algum valor significativo de estudo, em termos de suscetibilidade a colmatação, uma vez que o fenômeno é reológico.
- Quanto a microbiologia do sistema pode-se perceber que mesmo sem haver a troca de água de alimentação do sistema, a meio foi capaz de manter os microrganismos vivos no período de ensaios. A manutenção do meio pode ter sido possível via disponibilidade de nutrientes advinda do material geotécnico do filtro, especialmente se estes microrganismos forem da espécie oxido redutora.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, Thais L. **Estudo da formação de incrustações inorgânicas em membranas de nanofiltração utilizadas em processo de dessulfatação**. DCMM – PUC-Rio, 2006. 210p. Tese de Doutorado – Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. 2006.

ARAUJO, R. O. **Relatório final de atividades do bolsista**. Programa de C&T+I / FPTI-BR Bolsas ITI - Iniciação Tecnológica e Inovação. Foz do Iguaçu, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 12004: Solo – Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos**, Rio de Janeiro, 1990

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 12051: Solo – Determinação do índice de vazios mínimo de solos não coesivos**, Rio de Janeiro, 1991

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 13292: Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante**, Rio de Janeiro, 1995

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6457: Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**, Rio de Janeiro, 1986

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7211: Agregados para concreto**. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7214: Areia normal para ensaio de cimento**, Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica**, Rio de Janeiro, 2003

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 45: Agregados - Determinação da massa unitária e volume de vazios**, Rio de Janeiro, 2006

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente**, Rio de Janeiro, 2009

ÁVILA, Joaquim P. **Acidentes em barragens de rejeitos no Brasil**. [Internet]. São Paulo. 2016. Secretaria de Energia e Mineração. Trabalhos técnicos. Governo do Estado São Paulo. Disponível em < <http://www.energia.sp.gov.br/mineracao/trabalhos-tecnicos/> > Acesso em: 15 ago. 2017.

BARROS, Luciano C; VALENÇA, Lúcia M. M; MANSO, Valdir A. V; MADRUGA FILHO, José D; OLIVEIRA, João A. R. **Textura, composição e arredondamento**

dos sedimentos da plataforma continental interna adjacente às desembocaduras sul do canal de Santa Cruz e do rio Timbó, norte do estado de Pernambuco. Estudos Geológicos. Volume 17(1). Centro de Tecnologia e Geociências - Departamento de Geologia, Universidade Federal de Pernambuco, 2007.

BAVEYE, P.; VANDEVIVERE, P.; HOYLE, B. L.; DELEO, P. C.; LOZADA, D. S. **Environmental impact and mechanisms of the biological clogging of saturated soils and aquifer materials.** Critical Reviews in Environmental Science and Technology, pp 123-191. 1998.

BLANKERT, B.; BETETLEM, B.H.L.; ROFFERL, B. Dynamic optimization of a dead end filtration trajectory: Non-ideal cake filtration. **Journal of Membrane Science**, Netherlands, ed. 290, p. 114-124, 2006.

BLANKERT, B.; KATTENBELT, C.; BETETLEM, B.H.L.; Dynamic optimization of a dead end filtration trajectory: Blocking filtration laws. **Journal of Membrane Science**, Netherlands, ed. 285, p. 90-95, 2006.

BRASIL, Ministério de Minas e Energia, **Desenvolvimento de estudos para elaboração do plano duodecenal (2010 - 2030) de geologia.** Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral-SGM. Relatório técnico.30 p.2009. Disponível em <
http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1256650/P22_RT30_Perfil_de_brita_p_ara_construcao_civil.pdf/01c75ac7-ecd2-4d85-a127-3ecddec2a31 > Acesso em: 22 mai. 2018

BRASIL, **Rresolução CONAMA nº357**, 17 de março de 2005. Classificação de águas, doces, salobras e salinas do Território Nacional. Publicado no D.O.U.

CAPUTO, Homero P. **Mecânica dos solos e suas aplicações.** v.1, 6 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 248p.

CAPUTO, Homero P. **Mecânica dos solos e suas aplicações.** v.2, 6 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013. 498p.

CARDIA, Ruben J. R.; LAGE, Paula G. M. **Carreamento de material colorido na drenagem e a consideração da segurança de barragens.** XXXI Seminário Nacional de Grandes Barragens – SNGB. 2017. Comitê Brasileiro de Barragens. Belo Horizonte - MG. 2017.

CARVALHO, C. L. **Avaliação do processo de colmatação de filtros geotêxteis usados em sistema de drenagem de aterros sanitários.** 2010.153p. Dissertação de mestrado. Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos – São Paulo.

CLESCERI, L. S., GREENBERG, A. E., EATON, A. D. **Standart Methods for Examination of Water and Wastewater.** 20 ed. Washington, D.C.: American Public Health Association, 1999.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS. **A história das barragens no brasil Séculos XIX, XX E XXI.** Rio de Janeiro, 2011. 533p.

COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO – SABESP. **NTS 013: SÓLIDOS: métodos de ensaio**. São Paulo.1999.12p.

CORREIA, Luiza. C. S., **Avaliação da influência da difusão do oxigênio na formação de ocre em filtros geotêxteis**. 2014. 99p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil.

COSTA, Walter. D. **Geologia de Barragens**. 1 ed. São Paulo: Oficina de textos, 2012. 352p.

CRUZ, Paulo T. **100 Barragens Brasileiras: Casos Históricos**. 2 ed. São Paulo: Oficina de textos, 2014. 680p.

CULLIMORE, D.R., McCANN, A. E. **The identification, cultivation and control of iron bacteria in ground water**. Aquatic Microbiology, Editors Skinner & Shewan Academic Press. 1978.

DAS, Braja M. **Fundamento de Engenharia Geotécnica**. 6 ed. São Paulo: Cengage Learning, 2011.

DECESARO, Gabriel D. **Estudo da alteração de materiais basálticos presentes na face de jusante da barragem de enrocamento de Itaipu**. Trabalho de Conclusão de Curso. Toledo: Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curso de Engenharia Civil. Coordenação de Engenharia Civil, 2016.

DIEMER Francielle. **Estudo da permeabilidade do solo da região de Ijuí – RS percolando água e óleo diesel**. Trabalho de conclusão de curso. Ijuí: Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Curso de Engenharia Civil, Departamento de Tecnologia, 2008.

ELETROBRÁS. **Critérios de projeto civil de Usinas Hidroelétricas**. [S.l.], 2003. 279p.

FRAZÃO Conceição, C. A.; CUTRIM Furtado, J. G., LOPES Santos, L. R.; SILVA Costa, D. K. **Análise físico-químico da água da barragem do rio Flores, Joselândia – MA**. 53º Congresso Brasileiro de Química. Rio de Janeiro – RJ. 2013. Disponível em < <http://www.abq.org.br/cbq/2013/trabalhos/5/3118-15852.html> > Acesso em: 08 mai. 2018.

GONÇALVES, Jardel P. **Desenvolvimento e caracterização de concretos de baixo impacto ambiental contendo argila calcinada e areia artificial**. 2005. 292p. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – RJ, 2005.

HOLSBACH Turíbio S. **Avaliação da substituição da areia natural por areia artificial em argamassa de cimento cal e areia para assentamento**. Trabalho de Conclusão de Curso. Ijuí: Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Curso de Engenharia Civil, Departamento de Tecnologia, 2004.

ITAIPU BINACIONAL. **Aprovechamiento hidroelectrico de Itaipu. Presa de Tierra margen izquierda**. Sistema de Arquivo Técnico, 4280,50,8006,E R0A. vol. 1. Foz do Iguaçu, 1991.

ITAIPU BINACIONAL. **Itaipu: Usina Hidrelétrica, Projeto – Aspectos de Engenharia**. Diretoria Técnica da Itaipu Binacional, 784p, 2009.

JORDÃO, E. P. **Tratamento de esgoto doméstico**. 3 ed. Rio de Janeiro: ABES, 1995. 528p.

LADEIRA, Josias E. R. **Avaliação de segurança em barragens de terra, sob o cenário de erosão tubular regressiva, por método probabilístico**. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 17, Belo Horizonte, 2007.

LIMA, Maria J. C. P. A. **Introdução ao estudo das barragens de terra**. Curso de Construção. Instituto Militar de Engenharia. S/D.

MANDIGAN, M.T.; MARTINKO, J.M.; PARKER, J. **Microbiologia de Brock**. São Paulo: Pearson, 2008.

MARANGON, Marcio. **Tópicos em Geotecnia e Obras de Terra: Unidade 05: Barragens de terra e enrocamento**. Juiz de Fora. 2004.

NEVES, B. **Considerações sobre a ameaça ochre**. **Revista Brasileira de Engenharia de Barragens**. [On-line]. Ed. 2. Rio de Janeiro: COMITE BRASILEIRO DE BARRAGENS – CBCB, 2015. Maio 2015. Disponível em < <http://www.cbdb.org.br/documentos/RevEngBarragens2015-ano2-vol2.pdf> > Acesso em: 11 jul. 2017.

NOGUEIRA JR, Jehovah. **Colmatação química dos drenos de barragens por compostos de ferro**. Artigo Técnico, Associação brasileira de Geologia de Engenharia, 1986.

NOGUEIRA JR, Jehovah. **Possibilidade de colmatação química de filtros e drenos da barragem de Porto Palmeira (SP) por compostos de ferro**. 1988. 247p. Dissertação de mestrado. Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo. 1988.

NOGUEIRA, João B. **Uma Apreciação Prática da Teoria do Carreamento e suas Aplicações a Filtros de Proteção**. In: Seminário Nacional de Grandes Barragens, 14, 1981, Recife.

PALMEIRA, E. M.; & GARDONI, M. G. (2000). **Geotêxteis in Filtration: a state of the art review and remaining challenges**. International Symposium on Geosynthetics, GeoEng'2000, Melbourne, Austrália, pp. 85-110.

PENG, W.; ESCOBAR, I.C.; WHITE, D.B. **Effects of water chemistries and properties of membrane on the performance and fouling – a model development study**. Journal of Membrane Science, 238, 33-46, 2004.

PINTO, Carlos de S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 3 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 367p.

PORTAL R7. **Não foi a primeira vez: conheça 15 desastres com barragens que deixaram milhares de mortos**. Brasil. 2015. Disponível em < <http://noticias.r7.com/internacional/fotos/nao-foi-a-primeira-vez-conheca-15-desastres-com-barragens-que-deixaram-milhares-de-mortos-06112015#!/foto/1> > Acesso em: 15 ago. 2017.

POWER, Maurice C. **A new roundness scale for sedimentary particles**. Journal of Sedimentary Research 23: 117 – 119; published online June1, 1953.

QUINTAS, Fernando E. G. **Planejamento da Construção de Barragens de Terra**. 2002. 181p. Dissertação de Mestrado. Universidade de Porto, Porto – Portugal, 2002.

REIS, Rubens J. P. **Influência de areias artificiais de rochas britadas na estrutura e nas propriedades de concretos de cimento Portland**. 2004. 201p. Dissertação de Mestrado. Universidade de Minas Gerais, Belo Horizonte – MG, 2004.

REMÍGIO, Aline F. N. **Estudo de colmatação biológica de sistemas filtro-drenantes sintéticos de obras de disposição de resíduos domésticos urbanos sob condições anaeróbicas**. 2006. 154p. Tese de Doutorado. Universidade de Brasília, Brasília – DF, 2006.

RIBEIRO, Rosimeire A. V. **avaliação do desempenho hidráulico de barreiras de proteção ambiental produzidas com solo laterítico arenoso compactado, estabilizado quimicamente**. 2002. 81p. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira – São Paulo, 2002.

SCHÄFER, A.I.; WAITE, T.D.; FANE A.G. **Nanofiltration – principles and applications**, Elsevier, 2004

STERPEJKOWICZ-WERSOCKI, W. **Problem of clogging in drainage systems in the example of the Zur and Podgaje dams**. Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics, v.61, n.3-4, pp. 183-192, 2014.

VANDEVIVERE, Phillippe; BAVEYE, Philippe. **Saturated hydraulic conductivity reduction caused by aerobic bacteria in sand columns**. Soil Science of America Journal, vol. 56, n. 1. 1992.