CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS – UNIDADE ARAXÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS
MESTRADO PROFISSIONAL

LUIZ GUSTAVO MORAES DE MACEDO

DESEMPENHO DE CORTINAS DE TURBIDEZ EM SISTEMA DE DRENAGEM PLUVIAL APLICADAS EM PILHA DE ESTÉRIL

ARAXÁ – MINAS GERAIS
2023

LUIZ GUSTAVO MORAES DE MACEDO

DESEMPENHO DE CORTINAS DE TURBIDEZ EM SISTEMA DE DRENAGEM PLUVIAL APLICADAS EM PILHA DE ESTÉRIL

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas do CEFET-MG, na área de engenharia de minas, na linha de pesquisa em geologia de engenharia na mineração, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof(a). Dr(a). Maria das Graças Gardoni Almeida.

Coorientador: Prof. Dr. Ennio Marques Palmeira

ARAXÁ – MINAS GERAIS
2023

ATA DA 20ª DEFESA DE DISSERTAÇÃO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS – MESTRADO PROFISSIONAL

Aos 04 (quatro) dias do mês de agosto do ano de 2023 (dois mil e vinte três), às 14h 00min (quatorze horas e zero minutos), através da Plataforma Microsof TEAMS, foi instalada a Sessão Pública para a Defesa de Dissertação do(a) Mestrando(a) Luiz Gustavo Moraes de Macedo, *sob a forma totalmente remota (Resolução CPPG 08/2020, de 09/07/2020; Resolução CEPE 09/2020, de 17/11/2020)*, sendo a banca examinadora composta pela Profa. Dra Maria das Graças Gardoni Almeida (Presidente) – UFMG, Prof. Dr. Ennio Marques Palmeira (Membro externo) – UNB, Dra. Karla Cristina Araújo Pimentel Maia (Membro externo) – VALE S.A. e Profa. Dra. Hersília de Andrade Santos (Membro interno) – CEFET- Araxá.

Dando início aos trabalhos a Presidente, com base no Regulamento do Programa e nas Normas que regem as Sessões de Defesa de Dissertação, concedeu ao Mestrando Luiz Gustavo Moraes de Macedo, até 40 (quarenta) minutos para a apresentação do seu trabalho intitulado "**DESEMPENHO DE CORTINAS DE TURBIDEZ EM SISTEMA DE DRENAGEM PLUVIAL APLICADAS EM PILHA DE ESTÉRIL**", na Área de Concentração: *Engenharia de Minas* e Linha de Pesquisa *Lavra*. Terminada a exposição, a Presidente da Banca examinadora passou a arguição do candidato pelos membros da banca examinadora. Dando continuidade, ainda de acordo com as normas que regem a Sessão, a Presidente solicitou aos presentes que se retirassem do recinto para que a banca examinadora procedesse a análise e decisão, anunciando, a seguir publicamente, que o Mestrando foi aprovado com recomendações, por unanimidade. Para constar, foi lavrada a presente ATA que, após aprovada, vai assinada pelos membros da Banca Examinadora e pelo Mestrando.

Araxá, 04 de agosto de 2023

Documento assinado digitalmente
gov.br MARIA DAS GRACAS GARDONI ALMEIDA
Data: 04/08/2023 17:02:45-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Profa. Dra. Maria das Graças Gardoni Almeida
Presidente (UFMG)

Documento assinado digitalmente
gov.br ENNIO MARQUES PALMEIRA
Data: 07/08/2023 09:32:53-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Ennio Marques Palmeira
Membro externo (UNB)

Documento assinado digitalmente
gov.br KARLA CRISTINA ARAUJO PIMENTEL MAIA
Data: 04/08/2023 20:49:01-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Dra. Karla Cristina Araújo Pimentel Maia
Membro externo (VALE S.A)

Documento assinado digitalmente
gov.br HERSILIA DE ANDRADE E SANTOS
Data: 05/08/2023 13:50:04-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dra. Hersília de Andrade Santos
Membro interno (CEFET-MG)

Documento assinado digitalmente
gov.br LUIZ GUSTAVO MORAES DE MACEDO
Data: 07/08/2023 11:26:28-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Engº Luiz Gustavo Moraes de Macedo
Discente (CEFET-MG)

M141d

Macedo, Luiz Gustavo Moraes de
Desempenho de cortinas de turbidez em sistema de drenagem pluvial aplicadas em pilha de estéril / Luiz Gustavo Moraes de Macedo. – 2023.
147 f. : il.

Orientadora: Profa. Dra. Maria das Graças Gardoni Almeida.
Coorientador: Prof. Dr. Ennio Marques Palmeira.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Araxá, 2023.
Bibliografia.

1. Sistema de drenagem de minas – Teses. 2. Cortinas de turbidez – Teses. 3. Geossintéticos – Teses. 4. Pilhas de estéril – Teses. I. Almeida, Maria das Graças Gardoni. II. Palmeira, Ennio Marques. III. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. IV. Título.

CDU 622.5

Ficha elaborada pela Biblioteca – *Campus* Araxá – CEFET-MG
Bibliotecária: Gleisa Mara Alves CRB-6/1713

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pois com ele tudo é possível.

Agradeço aos meus orientadores, Maria das Graças Gardoni e Ennio Palmeira, por compartilhar comigo seus conhecimentos e me apresentar ao mundo dos geossintéticos. Eles me deram lições que levarei por toda minha vida profissional.

Agradeço as instituições e empresas que possibilitaram esta pesquisa, em especial as pessoas que representaram essas empresas e me auxiliaram a todo momento da minha pesquisa, destacando, André da Huesker, Silvio da Ober e professora Natália da UFSCAR.

Agradeço a todos aqueles que me auxiliaram na realização do presente estudo, seja numa seção de dúvidas ou coletando dados em campo, em especial ao meu amigo Luís Antônio (Luisinho) por me permitir realizar tais atividades.

Agradeço principalmente à minha esposa e filha, Verônica e Estela, pela paciência e companheirismo durante toda a minha jornada.

Agradeço a minha mãe e meu irmão, que mesmo distantes nunca deixaram de acreditar em mim.

Por último, agradeço em memória ao meu pai, pois sei que ele estaria orgulhoso pelo caminho que tracei até aqui.

RESUMO

Nos empreendimentos de mineração as águas pluviais são direcionadas para os corpos hídricos mais próximos, buscando evitar acúmulo e infiltração de água nas estruturas minerárias. No entanto, pouco se discute sobre minimização da turbidez no efluente gerado, uma vez que estruturas de barramentos à jusante são utilizadas para estabilizar e clarificar este efluente. Visando reduzir a necessidade de novos barramentos a indústria da mineração tem buscado tecnologias alternativas para reduzir o aporte de sedimentos finos em corpos hídricos naturais. Dessa forma, o conceito das cortinas de turbidez (*floating silt curtain*) pode ser importado para a mineração, seguindo com a avaliação do seu desempenho por meio de experimentos em estrutura de contenção de sedimentos suscetível a picos de vazão. O presente trabalho consiste na avaliação do desempenho de estruturas que utilizam geossintéticos para promover redução de turbidez, aplicadas no sistema de drenagem de uma pilha de estéril de mineração. Foram analisadas cortinas de turbidez em duas configurações, sendo obtido melhor resultado na geometria em U, com até 20% de redução de turbidez. As cortinas resistiram a dois períodos de análise apresentando sinais de degradação do geotêxtil, mas sem danos a estrutura. Os experimentos realizados demonstraram que as cortinas de turbidez são efetivas em condições específicas podendo ser aplicadas em sistemas de drenagens de pilhas de estéril de mineração.

Palavras chaves: Cortinas de turbidez, geossintéticos, redução de turbidez, pilha de estéril, sistema de drenagem de mina

ABSTRACT

In the mining industry the rainy water is directed to nearest water bodies, to reduce accumulation and infiltration on the mining structures. However, a little is explained about turbidity reduction in the effluent generated, the reason is mining dams used to stabilize and reduce turbidity in the effluent. To decrease the reliance on mining dams, the mining industry has sought alternative technologies to reduce to input of fine sediments in natural water bodies. In this way, the concept of floating silt curtain can be imported to mining, after that the evaluation of its performance through experiments in sediment containment structure susceptible to flow peaks, has been applied in real conditions. The present research consists of evaluating the performance of structures that promote turbidity reduction applied in the drainage system of a mining waste dump. Turbidity curtains were analyzed in two configurations, with the best result being obtained in the U-shaped layout, with up to 20% turbidity reduction. The curtains withstood two periods of analysis showing signs of degradation of the geotextile, but without damage to the structure. The experiments carried out demonstrated that the turbidity curtains are effective in specific conditions and can be applied in drainage systems of mining overburden piles.

Keywords: Silt curtains, geosynthetics, turbidity reduction, mine waste dump, drainage system of mine

Índice de Figuras

Figura 1-Principais características hidráulicas das correntes de turbidez. 22

Figura 2-Ensaio de perfuração dinâmica 30

Figura 3-Esquema do ensaio de permeabilidade normal e permissividade. 31

Figura 4-Mecanismos de colmatação de filtros geotêxteis. 36

Figura 5-Seção com elementos da cortina de turbidez 38

Figura 6-Configurações de instalação de cortinas de turbidez 40

Figura 7-Processos que afetam o desempenho das cortinas de turbidez 45

Figura 8-Espaçamento dos postes em função da força aplicada ao geotêxtil na silt fence. 48

Figura 9-Requisitos físicos vs espaçamento dos postes de uma silt fence 49

Figura 10-Microscópio ótico usado na pesquisa, com zoom máximo de 30x. 51

Figura 11-Mapa de localização da área em estudo 52

Figura 12-Precipitação média mensal – 1974 a 2020 54

Figura 13-Direção predominante dos ventos 55

Figura 14-Estrutura de contenção de sedimentos com relação a direção predominante dos ventos 56

Figura 15-Detalhe Típico da geometria da pilha. 57

Figura 16-Croqui Berma/Pilha 58

Figura 17-Arranjo geral dos canais periféricos PDE-SUL 59

Figura 18-Ponde de contenção de sedimentos 64

Figura 19-Imagens comparativas do ponde antes (a) e depois (b) da chuva ocorrida no dia 26/10/2021. 67

Figura 20-Imagens comparativas dos efeitos das chuvas na cortina de controle de sedimentos 68

Figura 21-Falha na cortina de controle de sedimentos (silt fence). 69

Figura 22-Registro fotográfico de fluxo hídrico normal (sup.) e invertido (inf.). 71

Figura 23-Fluxograma macro da metodologia adotada. 72

Figura 24-Ponde em processo de limpeza 73

Figura 25-Limpeza mecânica do material sedimentado no fundo do ponde. 74

Figura 26-Ponde após limpeza da estrutura, com detalhe para a criação de berma no canto inferior direito. 75

Figura 27-Caracterização e classificação de resíduos 76

Figura 28-Localização das amostras para caracterização 79

Figura 29-Instalação do sistema de ancoragem do cabo de tensão 84

Figura 30-Instalação das cortinas no ponde 85

Figura 31-Detalhe das amarrações intermediárias a o cabo de tensão 86

Figura 32-Cortina de turbidez sendo conferida antes da instalação. 88

Figura 33-Cravação dos trilhos utilizados no sistema de ancoragem nas margens 89

Figura 34-Disposição de instalação das cortinas no ponde. 89

Figura 35-Instalação da cortina de turbidez em setembro de 2022. 90

Figura 36-Esquema de instalação da silt fence. 91

Figura 37-Processo de instalação da cortina de controle de sedimento instalada na entrada do extravasor. 92

Figura 38-Cortina de controle de sedimento instalada na entrada do extravasor. 92

Figura 39-Amostras de geotêxtil tecido preparadas para a microscopia. 94

Figura 40-Marcação das amostras para ensaio de tração 96

Figura 41-Corte e separação das amostras para o ensaio de tração. 96

Figura 42-Ensaio de tração realizado pela UFSCAR 97

Figura 43-Coletas de amostras sobrenadante no ponde. 98

Figura 44-Cabo extensor para coleta segura de água na margem oeste do ponde 99

Figura 45-Coleta de turbidez com sonda multiparâmetro YSI Professional Plus PRO-DSS 100

Figura 46-Localização dos pontos amostrais 101

Figura 47-Fluxograma de coleta de dados no projeto no cenário 01 (2021-2022) 102

Figura 48-Fluxograma de coleta de dados no projeto no cenário 02 (2022-2023) 102

Figura 49-Disposição de cortinas de turbidez sugerida pela DTMB 104

Figura 50-Curvas granulométricas de amostras coletadas na pilha de estéril. 106

Figura 51-Curvas granulométricas das amostras coletadas no interior do ponde. 107

Figura 52-Curvas granulométricas plotadas no diagrama HxF 111

Figura 53-Cortinas emersas ao fluido, durante a descida do nível da água no ponde (maio de 2021). 115

Figura 54-Cortinas dispostas no extravasor para limpeza. 116

Figura 55-Microscopia ótica do geotêxtil tecido 120

Figura 56-MEV do geotêxtil tecido da cortina de turbidez virgem e exumada 121

Figura 57-Análise de elementos pela microscopia eletrônica de varredura. 121

Figura 58-MEV do geotêxtil tecido da cortina de turbidez virgem e exposta ao sol. 122

Figura 59-Comparativo do geotêxtil não tecido virgem com o impregnado por sedimentos do ponde na cortina de controle de turbidez. 123

Figura 60-Comparativo da impregnação a montante com jusante do geotêxtil não tecido. 123

Figura 61-Colmatação interna do geotêxtil não tecido extraído da silt fence. 124

Figura 62-Microscopia eletrônica de varredura do geotêxtil não tecido. 125

Figura 63-Pesagem da amostra GTX-NW-I para determinação de fator de impregnação 125

Figura 64-Ensaio de tração longitudinal e transversal no geotêxtil PP105/105DW. 127

Figura 65-Amostras de geotêxtil tecido exumadas, rompidas após ensaio de tração de faixa estreita. 128

Figura 66-Ensaio de tração no geotêxtil tecido, amostra exumada, sentido longitudinal. 128

Figura 67-Ensaio de tração no geotêxtil tecido, amostra exumada, sentido transversal. 129

Figura 68-Amostras de geotêxtil tecido expostas ao sol, rompidas após ensaio de tração de faixa estreita. 130

Figura 69-Ensaio de tração no geotêxtil tecido, amostra exposta ao sol, sentido longitudinal. 130

Figura 70-Ensaio de tração no geotêxtil tecido, amostra exposta ao sol, sentido transversal. 131

Figura 71-Comparativo entre ensaio de tração no geotêxtil tecido, sentido longitudinal. 132

Figura 72-Comparativo entre ensaio de tração no geotêxtil tecido, sentido transversal. 132

Figura 73-Comparativo entre força máxima na ruptura e deformação das amostras 133

Índice de Tabelas

Tabela 1-Funções características relacionadas e métodos de ensaio a serem empregados..... 25

Tabela 2-Resistência de diversos polímeros à degradação ambiental..... 34

Tabela 3-Inclinação do terreno vs o comprimento máximo para instalação de uma silt fence 47

Tabela 4-Requisitos mínimos adotados aos geotêxteis aplicáveis nas silt fence. 48

Tabela 5-Dados pluviométricos 1974 a 2018 sumarizados 54

Tabela 6-Principais características da pilha de estéril..... 57

Tabela 7-Características Físicas das Área de Contribuição das Estruturas de Drenagem Superficial – Descidas e Canais Periféricos 60

Tabela 8-Síntese dos cálculos de vazões de projeto 61

Tabela 9-Síntese do Dimensionamento Hidráulico dos Canais Periféricos e Descidas – Trecho sem degraus. 62

Tabela 10-Síntese do Dimensionamento Hidráulico dos Canais Periféricos e Descidas – Trecho com degraus. ... 63

Tabela 11-Dimensionamento do reservatório do Ponde de Contenção de Sedimentos..... 63

Tabela 12-Classificação dos Sedimentos Quanto á Granulometria..... 64

Tabela 13-Amostras coletadas na pilha de estéril para análise granulométrica. 78

Tabela 14-Amostras coletadas na pilha de estéril para análise granulométrica. 78

Tabela 15-Especificações técnicas das cortinas de turbidez..... 87

Tabela 16-Amostras analisadas pela microscopia eletrônica 95

Tabela 17-Amostras de tração 97

Tabela 18-Coeficiente de uniformidade (Cu) das amostras coletadas. 109

Tabela 19-Coeficiente de curvatura (Cc) das amostras coletadas..... 110

Tabela 20-Validação do critério de Chen et al. para as amostras selecionadas..... 112

Tabela 21-Dados de turbidez coletados no ponde entre outubro de 2021 e abril de 2022..... 113

Tabela 22-Dados de turbidez coletados no ponde entre novembro de 2022 e fevereiro de 2023. 117

Tabela 23-Resumo dos parâmetros físico-químicos coletados..... 118

Tabela 24-Amostras de MEV selecionadas para avaliação..... 120

Tabela 25-Amostras de MEV selecionadas como comparativo..... 124

Tabela 26-Fator de impregnação dos geotêxteis 125

Tabela 27-Resultado de resistência a tração das amostras virgens do fabricante, sentido longitudinal..... 126

Tabela 28-Resultado de resistência a tração das amostras virgens do fabricante, sentido transversal. 127

Tabela 29-Resultado de resistência a tração de faixa estreita das amostras da cortina, sentido longitudinal. . 127

Tabela 30-Resultado de resistência a tração de faixa estreita das amostras da cortina, sentido transversal.... 128

Tabela 31-Resultado de resistência a tração das amostras exposta ao sol, sentido longitudinal. 129

Tabela 32-Resultado de resistência a tração das amostras exposta ao sol, sentido transversal. 129

Índice de Equações

Equação [1]..... *22*

Equação [2]..... *31*

Equação [3]..... *32*

Equação [4]..... *32*

Equação [5]..... *36*

Equação [6]..... *37*

Equação [7]..... *47*

Equação [8]..... *60*

Equação [9]..... *61*

Equação [10]..... *103*

Equação [11]..... *109*

Equação [12]..... *111*

Sumário

1. INTRODUÇÃO 16

1.1. Objetivo geral 19

1.2. Objetivos específicos 19

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 20

2.1. Erosão e mecanismos de transporte 20

2.1.1. Correntes de turbidez 21

2.1.2. Fluxo de sedimentos liquefeitos 23

2.1.3. Fluxo granular 23

2.1.4. Fluxo de detritos 23

2.2. Fontes de turbidez 24

2.3. Geossintéticos 24

2.3.1. Funções dos geotêxteis aplicados 25

2.3.2. Critérios de sobrevivência 28

2.3.3. Danos durante a instalação 29

2.3.4. Degradação pelo meio ambiente 33

2.3.5. Mecanismos de colmatação de filtros geotêxteis 35

2.3.6. Permissividade e Transmissividade 36

2.4. Cortinas de turbidez (*silt curtain*) 37

2.4.1. Aspectos hidrodinâmicos 44

2.4.2. Limitações das cortinas de turbidez 44

2.5. Cortinas de controle de sedimentos (*silt fence*) 46

2.6. Ensaio de tração 50

2.7. Microscopia ótica e eletrônica de varredura 50

3. ÁREA DE ESTUDO 52

3.1. Localização 52

3.2. Caracterização climática 53
3.2.1. Pluviometria – Distribuição de chuvas 53
3.2.2. Direção dos ventos 54
3.3. Pilha de estéril 57
3.3.1. Arranjo geral do depósito 57
3.3.2. Estudos hidrológicos e hidráulicos 58
3.4. Bacia de contenção de sedimentos (ponde) 63
3.5. Restrições da pesquisa 65
3.5.1. Picos de vazão e turbidez 66
3.5.2. Restrições operacionais e de segurança 69
3.5.3. Direção do vento variável 70
4. METODOLOGIA 72
4.1. Caracterização das condições experimentais 73
4.1.1. Limpeza do ponde 74
4.1.2. Caracterização do estéril 75
4.1.3. Caracterização do material a ser filtrado 77
4.1.4. Dispositivos de controle de turbidez 82
4.2. Caracterização dos geotêxteis utilizados 93
4.2.1. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) 93
4.2.2. Ensaios de tração 95
4.3. Análises experimentais 98
4.3.1. Análise do efluente líquido 98
4.3.2. Análise de turbidez e efetividade das cortinas 100
4.4. Premissas para dimensionamento de novas estruturas 103
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES 106
5.1. Dados coletados 106

5.1.1. Granulometria das amostras 106
5.1.2. Análise da estabilidade interna do solo 108
5.1.3. Análise de turbidez 113
5.1.4. Parâmetros físico-químicos 118
5.1.5. Resultados da análise por microscopia ótica e eletrônica de varredura ... 119
5.1.6. Fator de impregnação dos geotêxteis 125
5.1.7. Dados dos ensaios de tração 126
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES 134
7. REFERÊNCIAS 137
ANEXOS 141

1. INTRODUÇÃO

Na indústria da mineração é comum realizar o direcionamento das águas pluviais, sempre que possível, para os corpos hídricos mais próximos. Tal prática busca evitar a infiltração de água nas estruturas de mineração (pilhas, depósitos, cavas entre outros), reduzindo o risco de elevação na poropressão dos taludes, mantendo-os estáveis e com fatores de segurança próximo aos estabelecidos pelo projeto. No entanto, os métodos de minimização da turbidez no efluente gerado pelos sistemas de drenagens são pouco discutidos, muito em função da existência de barragens ou diques de sedimentos, que estabilizam e clarificam o efluente gerado pela chuva (água pluvial + sedimentos carreados).

A área em estudo, consiste no sistema de drenagem de uma pilha de estéril, ainda em fase construtiva, presente numa mineração de rocha fosfática no Alto Paranaíba, em Minas Gerais, Brasil, que apresenta uma distribuição pluviométrica concentrada num período restrito do ano (período de chuvas). Tal sistema apresenta como característica uma alta capacidade de carreamento de sólidos e indisposição de uma estrutura de barramento que promova a clarificação de forma efetiva do efluente pluvial, sendo, portanto, necessária a adoção de medidas de engenharia que promovam a redução da turbidez antes da destinação final desse efluente.

Anterior a concepção do projeto das cortinas de turbidez, com núcleo filtrante de geotêxtil, foram avaliados diversos processos, que na teoria, se mostram mais eficazes no processo de clarificação de efluentes em si, tais como uso de floculantes, espessadores, filtros entre outros. No entanto, a maioria dos métodos demandam um fluxo de efluentes constantes, incompatível com a variabilidade de precipitação presente na área em estudo. Outros métodos, que promovem a separação sólido-líquido por batelada, tais como filtros prensa, demandam uma contenção prévia para tratamento de volumes fixos, enquanto outros métodos apresentam volumes de tratamento reduzidos, tais como filtros de mesa, membrana ou de areia, não condizentes com o tratamento demandado pelo efluente pluvial da área de estudo.

Avaliando as características da área em estudo, a confecção de um barramento que apresente uma alta capacidade de amortecimento para águas pluviais e um elevado período de residência, seria a opção mais assertiva para o problema levantado. Contudo, com a crescente discussão acerca das barragens de mineração, associado às restrições de uso e ocupação do solo para novos projetos de mineração, o dimensionamento de sistemas de drenagem superficial não

contempla uma estrutura robusta e de baixo custo para conter os sólidos suspensos e assim promover a redução da turbidez do efluente gerado pela chuva de forma eficaz, nos mesmos moldes das barragens. Dessa forma, o dimensionamento de estruturas alternativas que promovam a redução de turbidez para atender a legislação vigente tornam-se necessárias.

Nesse contexto, podemos importar para a mineração o conceito das *silt curtains*, ou cortinas de turbidez, para contenção e controle na dispersão de partículas em corpos hídricos. A utilização dessas estruturas é amplamente aplicada em obras de engenharia civil, ambiental, sanitarista e hidráulica, que culminam na geração de sólidos em suspensão e/ou lodo, no entanto, seu uso aplicado em sistemas de drenagem superficiais na mineração é pouco usual e sem registros bibliográficos.

As cortinas de turbidez são estruturas desenvolvidas para contenção e controle na dispersão de partículas em corpos hídricos, originalmente idealizadas para conter plumas de sólidos suspensos, em construções marinhas, também são utilizadas com o objetivo de reduzir os custos com produtos químicos na gestão do lodo em ETA - Estações de Tratamento de Água (OLIVEIRA et al., 2020a). A instalação das cortinas de turbidez permite acelerar o processo de sedimentação de partículas sólidas que tem sua efetividade diretamente associada às condições de instalação. Alguns autores, tais como Francingues e Palermo (2005), consideram as cortinas de turbidez como uma das melhores práticas de gerenciamento de impactos a recursos hídricos sensíveis, infelizmente, os fatores que contribuem para a eficácia das cortinas em diferentes circunstâncias são mal compreendidos e culminam no entendimento de que, as cortinas de turbidez não funcionam em muitas das condições.

O presente estudo possui natureza científica aplicada de uma pesquisa exploratória, partindo de um problema real, no qual objetiva-se a redução de turbidez do efluente gerado pelo sistema de drenagem de uma pilha de estéril, adotando uma abordagem quantitativa dos parâmetros de pluviosidade; turbidez do efluente, antes e depois das cortinas de turbidez. Para tanto, adota o método hipotético-dedutivo para avaliar se as cortinas de turbidez, *silt curtains*, e as cortinas de controle de sedimentos, *silt fence*, podem ser aplicadas de forma eficaz na redução de turbidez, quando instaladas num sistema de drenagem superficial de uma pilha de estéril, assim como, se resistirão a condições adversas de obra em local sujeito a picos de vazão. Tais hipóteses foram testadas com base em experimentos aplicados em obra real.

No projeto em questão, a estrutura em estudo está exposta a picos de vazão naturais, que promovem correntes com velocidades elevadas, acarretando a elevação do risco de ruptura ou

falha dos dispositivos instalados e alguns riscos referentes à segurança do sistema. Não por menos, a maioria dos cenários de risco previamente levantados giram em torno de chuvas intensas e pontuais capazes de sobrecarregar o sistema de drenagem do depósito e elevar rapidamente o nível da estrutura de contenção, impondo as estruturas de clarificação a um regime hídrico de alta energia.

Dessa forma, as cortinas foram instaladas em configuração de labirinto, compondo duas seções paralelas, com angulação de aproximadamente 45° com relação ao fluxo principal, considerado no projeto inicial como unidirecional, elevando assim a probabilidade de a cortina instalada resistir às variações climáticas e de tração durante todo o período de chuvas de 2021-2022.

Ao obter os primeiros dados a cortina de turbidez demonstrou eficiência acima do esperado, para as condições de projeto, fechando o primeiro mês de experimento com eficiência de 92.19% com a estrutura vertendo (ambiente lótico de fluxo constante) e 60.83% com a estrutura em condição de ambiente lêntico, sem avarias face a chuvas torrenciais. Nos meses subsequentes foi evidenciado uma redução significativa da eficiência das cortinas, culminando em eficiências médias de 3,58% com o ponde vertendo e 3,20% com o ponde não vertendo, apresentando momentos com eficiência negativa.

Ações complementares foram adotadas com o objetivo de melhorar a turbidez do efluente de saída do ponde, tais como a instalação de uma cortina de controle de sedimentos (*silt fence*), ortogonal ao fluxo preferencial no período de chuvas 2021-2022, localizada na saída da bacia de contenção de sedimentos. No entanto, a *silt fence* sofreu falha estrutural, vindo a romper sem que houvesse ganhos significativos ao projeto.

No período de chuvas subsequente (2022-2023) as cortinas foram dispostas numa única seção em configuração em “U”, permitindo assim, a avaliação da efetividade dos dispositivos na redução de turbidez em duas configurações distintas. Os valores obtidos com a estrutura de contenção vertendo nessa última configuração é de 19,29%, sendo que para o regime lêntico a eficiência é praticamente nula com 0,42%, apresentando momentos com eficiência negativa.

1.1. Objetivo geral

O objetivo do estudo é avaliar o desempenho de dispositivos de controle de sedimentos, tais como cortinas de turbidez (*silt curtain*) e cortinas de controle de sedimentos (*silt fence*) por meio de experimento de campo em estruturas suscetíveis a picos de vazão, localizadas a jusante de uma pilha de estéril de uma mineração de rocha fosfática no Alto Paranaíba, Minas Gerais, Brasil.

1.2. Objetivos específicos

São objetivos específicos do presente estudo.

- Avaliar o desempenho das cortinas de turbidez em diferentes configurações;
- Avaliar a aplicabilidade de cortinas de contenção de sedimentos em meio aquoso;
- Avaliar a integridade e degradação dos geossintéticos adotados nos experimentos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Erosão e mecanismos de transporte

O termo erosão deriva do verbo latim *erodere*=escavar ou *gliptogênese,* dos termos gregos *glyptós*=gravado + *génesis*=geração e é um dos principais fenômenos naturais geológicos, no qual a superfície da terra é desgastada e modelada por processos físicos, químicos e biológicos (SUGUIO, 2003)

A erosão é um fenômeno que quando ocorre sem a interferência antrópica e através de agentes erosivos naturais tais como águas, vento e geleiras, sendo classificada denominada de erosão natural ou geológica. Os agentes envolvidos são reconhecidos como processo erosivos; pluvial, fluvial, marinho, eólico e glacial, todos esses agentes sendo acionados pela força gravitacional (SUGUIO, 2003)

As águas pluviais em superfície promovem o processo erosivo que tem início com a erosão laminar, e podem prosseguir na forma de sulcos, ravinas e voçorocas, causando problemas à cobertura pedológica (SILVA, 2004)

Suguio (2003), afirma que as áreas que apresentam clima mais úmido, a cobertura vegetal promove maior proteção do solo contra erosão. O mesmo não ocorre ao analisar regiões áridas com vegetação escassa. O autor também aborda a declividade do terreno, no qual mesmo em condições climáticas similares, regiões com declives mais acentuados são mais rapidamente erodidas, a geologia, onde em regiões com rochas mais permeáveis, sofrerão maior dissolução dos minerais e em geral rochas bem cimentadas e maciças, tendem a ser mais resistentes a erosão que siltitos finos pouco consolidados.

Fazendo abstração da erosão eólica, toda a remoção de solo exige a presença de água sobre o terreno, cuja fonte principal é a chuva. Nesse aspecto, a chuva exerce sobre o solo uma ação erosiva mediante o impacto das gotas de chuvas, em velocidade e energia variável de acordo com o seu diâmetro, e mediante a ação do escoamento superficial(BERTONI; NETO, 2008)

Segundo Bertoni & Neto, (2008), a erosão causada pela água ocorre principalmente pelas seguintes formas:

- **Erosão pelo impacto da chuva -** Ocorre no primeiro momento, quando as gotas de chuva tocam o solo causando o desprendimento das partículas, dividindo-as em

menores, diminuindo a capacidade de infiltração, fazendo com que haja acúmulo de água na superfície do terreno;

- **Erosão laminar -** A erosão laminar é o segundo estágio, no qual a água acumulada inicia o deslocamento no sentido da inclinação do terreno, retirando pequenas camadas de solo no seu trajeto; essa erosividade depende do volume da enxurrada;
- **Erosão em sulcos -** Surge devido às pequenas irregularidades na declividade do terreno, direcionando o fluxo e promovendo o acúmulo de água em alguns pontos do terreno de tal forma que atinge volume e velocidade necessários para a formação de riscos (incisões) no solo.
- **Erosão em Voçorocas -** A erosão em voçorocas é a forma mais agressiva de erosão e a de maior complexidade de contenção, ocorre quando existe uma grande concentração de enxurradas, no mesmo local ao longo do tempo. As voçorocas são caracterizadas pela ação erosiva regressiva ocasionadas pelas águas do lençol freático, que surgem nas suas cabeceiras, propiciando o carreamento de partículas e a formação de cavidades no solo.

Grande parte dos sedimentos são transportados por processos gravitacionais subaquosos, imersos em massas de água, que podem ser induzidos por processos externos, como ondas, marés e correntes e processos internos como maremotos, condicionados em quatro tipos de fluxo conforme o mecanismo de sustentação das partículas acima do fundo subaquoso (SUGUIO, 2003).

2.1.1. Correntes de turbidez

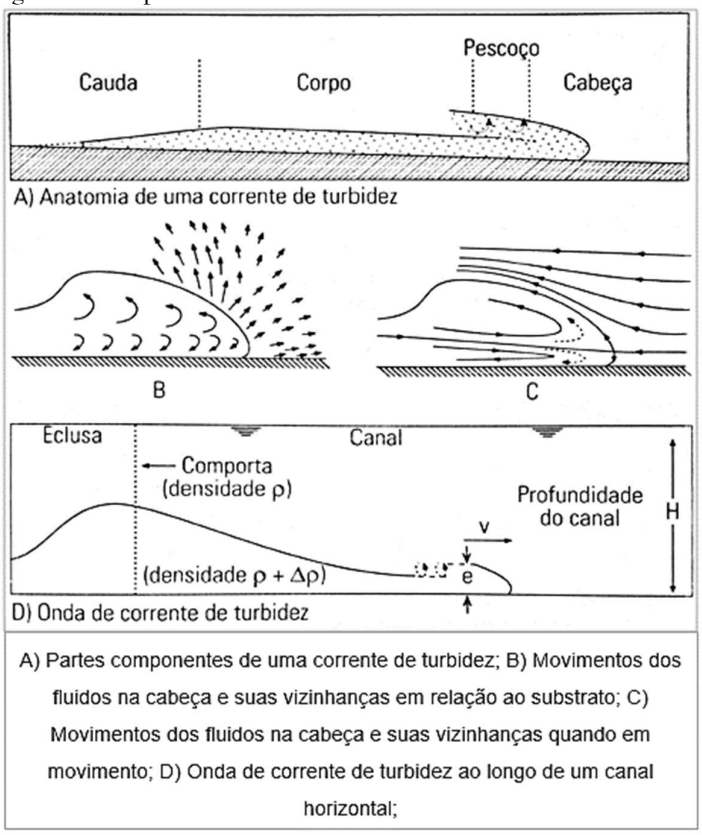
São fluxos mantidos pela ação da gravidade sobre porções com densidade levemente diferentes da massa fluida, onde as partículas são sustentadas pela componente dirigida acima do fluido em turbulência (SUGUIO, 2003)

Segundo Suguio, (2003), as correntes de turbidez são subdivididas anatomicamente em quatro partes distintas: cabeça, pescoço, corpo e calda (Figura 1).

A cabeça geralmente é a parte mais espessa que o resto e apresenta forma e comportamento hidrológico particular. A água e sedimentos fluem para frente e para cima através da cabeça e circulam para trás da cabeça, ao passo que parte do fluxo é perdido em redemoinhos. Os fragmentos mais grossos recirculam na corrente enquanto a fração mais fina é incorporada à “nuvem” diluída que forma a calda. Na cabeça são identificados processos concomitantes de erosão e deposição e exige do meio um suprimento contínuo de fluido mais

denso (mistura de sedimentos e água) para compensar a perda de material para os redemoinhos. A velocidade de deslocamento dessa parte é mais lenta que o corpo em partes mais íngremes dos canais e a espessura da cabeça pode chegar a ser superior ao dobro do corpo, (SUGUIO, 2003).

Figura 1-Principais características hidráulicas das correntes de turbidez.



A) Partes componentes de uma corrente de turbidez; B) Movimentos dos fluidos na cabeça e suas vizinhanças em relação ao substrato; C) Movimentos dos fluidos na cabeça e suas vizinhanças quando em movimento; D) Onda de corrente de turbidez ao longo de um canal horizontal;

Fonte: Suguio (2003)

Segundo Middeton & Hampton (1976) *apud* (SUGUIO, 2003), a velocidade V da cabeça, de uma corrente de turbidez, poderia ser calculada pela fórmula abaixo:

$$v = 0{,}7\sqrt{\left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right) g.e} \qquad \text{Equação [1]}$$

Onde:

- v é a velocidade (m/s) da cabeça da corrente de turbidez
- $\Delta\rho$ representa a diferença de densidade entre os fluidos (kg/m³)
- ρ corresponde a densidade da água pura (kg/m³)
- g é a aceleração da gravidade (m/s²)
- e representa a espessura da cabeça da corrente (m).

2.1.2. Fluxo de sedimentos liquefeitos

Segundo Suguio (2003), o termo liquefação é utilizado para descrever a expansão da camada granular, no qual o fluxo de um fluido, dirigido para cima, através da camada granular promove a expansão da camada granular de dispersão granular, que na prática, comporta-se como um fluido muito viscoso. Nos sedimentos liquefeitos, os grãos são parcialmente sustentados pelo fluido intersticial, tornando-se instáveis e podendo fluir por declives suaves. Uma vez cessado rapidamente o fluxo de transporte a água intersticial é gradativamente expulsa durante o processo de consolidação da camada sedimentar.

2.1.3. Fluxo granular

O fluxo granular ocorre em declividades entre 18 a mais de 30 graus. E tem em sua composição partículas grandes o suficiente para que não estejam sujeitas a flutuações, havendo o movimento de sedimentos pela interação entre os grãos, sendo um estágio intermediário entre o fluxo liquefeito e o fluxo detrítico (SUGUIO, 2003)

2.1.4. Fluxo de detritos

O fluxo de detritos ocorre como o movimento de declive em resposta a ação da gravidade de uma mistura de sólidos granulares e argilominerais com água. Enquanto os sedimentos estiverem secos o atrito entre as partículas mantem o material coeso em estágio crítico de ruptura, mas ao ocorrer a umectação, pode deflagrar o fluxo de detritos (SUGUIO, 2003)

Em geral os fluxos de detritos ocorrem em velocidades que se assemelham ao concreto úmido, na ordem de 1 a 3m/s, sendo classificados como processos de fluxos granulares subaquosos, no qual os sólidos granulares ficam literalmente flutuando na matriz de argilominerais e água. O fluxo ocorre quando o esforço de cisalhamento ultrapassa a resistência total do material, relacionando a coesão e o ângulo de atrito do material. A competência dos fluxos de detritos é controlada pela resistência do material e a densidade do fluido composto pelos argilominerais e a água (SUGUIO, 2003).

2.2. Fontes de turbidez

As fontes de turbidez numa obra de engenharia estão intimamente relacionadas ao ciclo sedimentar, variando consideravelmente em função das peculiaridades de cada projeto. Ao avaliar as características do presente estudo é possível identificar que quanto maior a intensidade da chuva, maior será o fluxo e consequentemente maior a capacidade de suspensão das partículas e de transporte horizontal, favorecendo a elevação da turbidez e formação de uma pluma de material dentro da estrutura de contenção de sedimentos.

Segundo Bray, (2008) e Radermacher et al., (2016) as principais fontes de turbidez em obras de drenagem estão relacionadas ao deslocamento do material *in-situ*; elevação do material à superfície; transporte horizontal; e colocação ou tratamento posterior.

Todas as operações que envolvem o transporte de sedimentos possibilitam o deslocamento do material ao longo da coluna de água, e suspendem as partículas sólidas, as quais dispõem o sedimento mais fino ao transporte por dispersão de correntes. A ressuspensão ocorre em função de uma série de fatores que incluem (PALERMO et al., 2008):

- Propriedades dos sedimentos, como densidade aparente seca *in situ* (concentração de sólidos, conteúdo de sólidos ou conteúdo de água), conteúdo orgânico, distribuição de tamanho de partícula e mineralogia.
- Condições do local, como profundidade da água, correntes, ondas e presença de terra firme ou rocha sólida.
- Natureza e extensão dos impedimentos, como detritos, pedras soltas, pedras e obstruções.
- Considerações operacionais, como a espessura dos cortes de dragagem, tipo de equipamento de dragagem, método de operação e habilidade do operador.

2.3. Geossintéticos

Os geossintéticos podem ser entendidos como produtos poliméricos utilizados em obras geotécnicas e de proteção ambiental. Eles podem ser utilizados atendendo a uma grande gama de funções em uma grande variedade de obras geotécnicas, tais como reforço, estabilização de taludes, taludes íngremes, estabilização de solos, drenagem e filtração, cortina para fluidos e gases, controle de erosão, cortina de sedimentos, proteção ambiental etc. (PALMEIRA, 2018).

Geotêxteis e produtos correlatos que são empregados no controle de turbidez associam duas condições de obras. Os sistemas drenantes desempenham uma ou mais das seguintes funções: filtração, separação e drenagem. Já as obras de controle de erosão os geotêxteis e produtos correlatos são empregados em para prevenir a migração de material de graduação fina que poderia ser carreado por gradientes hidráulicos alternados (IGS BRASIL, 2020).

Ao indicar que um produto pode atender a uma determinada vida de serviço, o fabricante não está assumindo uma garantia, mas sim disponibilizando um meio para seleção de produtos. Nesse caso, são assumidas condições ambientais padrão: solo e água naturais com pH entre 4 e 9 e temperatura do solo menor que 25ºC, assim, considerando apenas os fatores de degradação relacionados ao meio ambiente e se o produto for submetido a processos de recebimento, armazenamento, instalação e manutenção apropriados, ele pode atender a um requisito de vida de serviço de projeto inferior ou igual ao indicado.

2.3.1. Funções dos geotêxteis aplicados

Os produtos nestas obras desempenham as funções de filtração, separação e drenagem, podendo, de acordo com a característica da obra, ser associada a função reforço (Tabela 1). A função de separação é sempre usada em conjunto com filtração ou reforço e nunca será especificada isoladamente (IGS BRASIL, 2020).

Tabela 1-Funções características relacionadas e métodos de ensaio a serem empregados

Características	**Método de ensaio**	**Funções**		
		F	S	D
Resistência à tração na ruptura	NBR ISO 10319	C	C	C
Deformação na carga máxima	NBR ISO 10319	C	C	C
Resistência à compressão sob carga	ISO 25619-2	--	--	B
Resistência à tração de emendas	NBR ISO 10321	E	E	E
Resistência à tração de juntas internas	ISO 13426-2	--	--	E
Resistência ao puncionamento estático	NBR ISO12236	C	C	--
Resistência à perfuração dinâmicaa	NBR ISO 13433	C	C	--
Características de atrito	NBR ISO12957-1 e 2	E	E	E
Fluência à compressão	NBR ISO 25619-1	--	--	B
Dano sob carga repetida	NBR ISO 10722	E	E	E
Abertura de filtração característica	NBR ISO 12956	C	C	--
Permeabilidade normal ao plano	NBR ISO 11058	C	C	--
Capacidade de fluxo no plano	NBR ISO 12958	--	--	C
Durabilidade	ISO TS 13434 e ABNT NBR 16757-1	C	C	C
Rigidez a 2%,5% e 10%	NBR ISO 10319	--	--	--

Nota: F filtração; S separação; D drenagem; R reforço; C controle obrigatório; B relevante para todas as condições de uso; E relevante para condições específicas; -- não relevante par a função
Fonte: Modificado de IGS Brasil (2020)

Apesar das cortinas de turbidez e cortinas de contensão de sedimentos apresentarem, de forma secundárias, as funções de separação, dividindo os efluentes em fase montante e jusante, assim como a função de drenagem, direcionando o fluxo do efluente pela obra, a principal função dos geotêxteis aplicados nessa pesquisa é a função de filtração.

A filtração é uma das funções mais comuns do geotêxtil e é, geralmente, adotada como uma camada filtrante em obras geotécnicas e de proteção ao meio ambiente. A utilização de geotêxtil como filtro traz vantagens em relação aos filtros granulares convencionais de ordem prática, uma vez que propiciam uma maior facilidade construtiva, repetibilidade das propriedades, uniformidade do material, menor volume na obra e redução de utilização de materiais naturais. Entretanto, assim como no caso de filtros granulares, o geotêxtil deve atender a requisitos específicos para funcionar apropriadamente como filtro (PALMEIRA, 2018).

A filtração compreende o movimento de um líquido através de um material que permite o livre fluxo ao mesmo tempo que é capaz de reter uma porção do solo por onde a água percola. Os filtros atuam evitando que o material fino seja lavado e podem ser geometricamente estáveis ou hidraulicamente estáveis. O primeiro critério é cumprido quando os finos no filtro não passam através dos poros do material filtrante. A única maneira pela qual a falha pode ocorrer é quando a camada grossa do filtro se torna instável. Em um filtro hidraulicamente estável, é possível que os finos sejam transportados através dos poros do material filtrante, mas um certo gradiente hidráulico é necessário para tal transporte. Se pode provar que tal gradiente não será alcançado, então o filtro também é estável (BEZUIJEN; PILARCZYK, 2012).

Segundo Bezuijen e Pilarczyk (2012), um filtro granular é composto por uma camada filtrante, de material natural aplicada confeccionado durante a construção da estrutura e, normalmente, com uma distribuição de tamanho de grão bastante uniforme. Como o subsolo é composto por um material de granulometria variável. É importante que o subsolo seja estável internamente, uma vez que há o risco de que as partículas migrem no subsolo e terminem na interface entre o subsolo e o filtro, levando a uma menor permeabilidade local. Quanto aos filtros hidráulicos, este não é um critério absoluto. Uma vez que é possível que ao migrar do subsolo, essas partículas criem um filtro natural na interface com o filtro. Perto da camada de filtro, a permeabilidade será um pouco maior em virtude dos finos lavados. No entanto, também é possível que as partículas sejam coletadas na fronteira entre o subsolo e o filtro, criando um limite impermeável.

O comportamento ideal de um sistema filtrante é caracterizado por um contato íntimo entre o solo e filtro, mantendo intacta a estrutura do solo. Para que isso aconteça é necessário que o geotêxtil apresente, no curto prazo, uma permeabilidade superior à do solo, evitando a ocorrência de perdas de carga no fluxo de água. A longo prazo, a permeabilidade do filtro pode eventualmente sofrer redução, mas ainda assim, mantendo-se superior à do solo(AGUIAR; VERTEMATTI, 2015).

Diversos fatores que influenciam a eficiência hidráulica do geotêxtil que incluem as condições de instalação (subleito e maquinário de construção), materiais de cobertura (enrocamento ou agregados), clima e características do geotêxtil. Para que os geotêxteis desempenhem corretamente as funções pretendidas ao longo da vida útil da estrutura, os geotêxteis devem primeiro ter a capacidade de resistir às condições de construção. Uma vez que, caso o geotêxtil for danificado (rasgo / furo / ruptura) durante a fase de instalação, o parâmetro de durabilidade é cessado (CHEAH et al., 2017). Segundo Diederich (2000), a maior tensão mecânica induzida nos geotêxteis ocorre, normalmente, durante a fase de carregamento e construção, e não ao longo da vida útil da estrutura. Portanto, é importante que o material "sobreviva" (não se rompa/fure) durante a instalação para garantir que o geotêxtil e a estrutura continuem a funcionar conforme necessário.

Para que um filtro de geotêxtil atue satisfatoriamente retendo as partículas de um solo, algumas condições são requeridas(GARDONI, 2000; GIROUD, 2010):

- O solo deve estar em contato íntimo com o filtro de geotêxtil, não havendo espaço aberto entre o solo e o geotêxtil onde as partículas possam se mover ou acumular.
- O solo deve ter uma distribuição de tamanho de partículas contínua (solo bem graduado) e estar no estado denso, o que assegura uma interação máxima entre as partículas de solo;
- As aberturas do filtro geotêxtil devem ser apropriadas.

Falhas no dimensionamento do conjunto geotêxtil-solo podem acarretar problemas na estrutura que vão desde a erosão externa, quando as partículas são transportadas da superfície do solo até cursos de água, à erosão interna, causada pelo deslocamento das partículas no interior do solo acarretando em erosão interna (sufusão ou *piping* – erosão regressiva), originados do fluxo unidirecional da água, ou de infiltrações locais, ou a partir de fluxos turbulentos, ou fluxos bidirecionais originados de ondas (AGUIAR; VERTEMATTI, 2015).

2.3.2. Critérios de sobrevivência

Para Aguiar e Vertematti (2015) , as condições de instalação dos geotêxteis em estruturas hidráulicas são as mais severas e podem assumir importância significativa na elaboração de um projeto, no qual deve-se avaliar os seguintes aspectos:

a) **Resistência à perfuração dinâmica:** Durante o processo de instalação da camada de agregado, enrocamento ou de pedras, frequentemente promove ação dinâmica no filtro geotêxtil. Tal característica pode ser medida pelo ensaio de resistência a puncionamento estático ou CBR (ABNT NBR ISO 12236, 2013) ou por meio do ensaio de perfuração (ABNT NBR ISO 13433, 2013), que simula a queda de um cone sobre o geotêxtil.

b) **Energia de deformação absorvida pelo geotêxtil:** A energia desenvolvida por uma pedra em queda livre de determinada altura, sobre um geotêxtil estendido no solo, provoca um alongamento ou em casos extremos a ruptura. O alongamento do geotêxtil depende da marca impressa pela pedra no solo. Quanto mais mole o solo, maior será a marca da pedra no terreno e consequentemente menores serão os danos ao geotêxtil. Ao contrário, quanto mais duro for o terreno, maior será a demanda de um geotêxtil mais espesso e de maior resistência.

c) **Flexibilidade:** O geotêxtil deve manter contato íntimo com o solo e quanto maior for esse contato (solo-geotêxtil) menor o risco de partículas em suspensão entrarem em contato com o geotêxtil. Sendo assim, quanto mais flexível for o geossintético, maior será sua acomodação ao terreno e melhor será o seu desempenho.

d) **Resistência à passagem de água:** A capacidade de um geotêxtil de se molhar, também conhecido como “molhabilidade” é o parâmetro que define a carga hidráulica (mm) mínima necessária para atravessar o geotêxtil através dos ensaios da norma NF G 38020. Esse parâmetro pode ser considerado crítico quando empregados em estruturas as quais estão sujeitas a ciclos de secagem e saturação.

e) **Sensibilidade aos solos finos em suspensão:** A presença de finos em suspensão é o maior risco de colmatação para filtros geotêxteis, sendo a principal razão para um bom contato ente o geotêxtil e o solo. Em casos específicos nos quais a presença de finos ainda persiste, mesmo após limpeza da estrutura é necessário adotar um geotêxtil que permita a passagem de partículas finas, minimizando a sua colmatação.

f) **Resistência à agressividade do meio ambiente:** Ao longo do tempo o ambiente afeta os geotêxteis por meio da luz ultravioleta, de produtos químicos e agressividade biológica.

As características (a) e (b) são relacionadas a sobrevivência do geotêxtil, sob solicitações mecânicas, durante a instalação, enquanto os itens (c) à (f) correspondem a durabilidade e desempenho no longo prazo.

2.3.3. Danos durante a instalação

Para que o geotêxtil desempenhe suas funções corretamente, é imprescindível que este resista ao processo de instalação, uma vez que os geotêxteis são repetidamente submetidos a cargas volumosas e dinâmicas que podem degradar a eficiência hidráulica do geotêxtil.

Apesar da semelhança das estruturas geotécnicas, os materiais disponíveis e técnicas construtivas e as especificações normativas diferem significativamente. Propriedades como resistência à tração, resistência à perfuração e gramatura, são reconhecidas como parâmetros índices, mesmo que, alguns sistemas considerem a resistência ao alongamento uma propriedade importante. Por exemplo, o sistema de classificação alemão diferencia entre tecidos (baixo alongamento) e geotêxteis não tecidos. Já a classificação AASHTO M288-96 é mais restritivo com relação as propriedades mecânicas impondo aos geotêxteis um menor alongamento e define o limite empiricamente em 50% de alongamento (DIEDERICH, 2000).

A norma europeia EN 13249 relaciona as características necessárias para geotêxteis e produtos relacionados com geotêxteis usados na construção de estradas e outras áreas de tráfego. Essa norma exige características tais como: resistência à tração, alongamento à carga máxima, punção estática (CBR), perfuração dinâmica e resistência a danos durante a instalação (DIEDERICH, 2000).

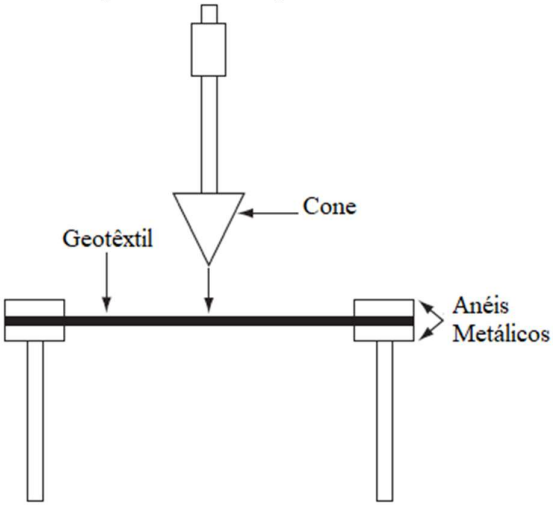
No Brasil a avaliação da resistência a perfuração segue a NBR ISO 13433 de 2013, no qual um cone com massa e dimensões padronizadas desce em queda livre de uma altura fixa e atinge um corpo de prova preso entre anéis metálicos, provocando um furo cujo diâmetro é medido por outro cone padronizado (Figura 2) (COSTA et al., 2008).

Para investigar os efeitos dos danos de instalação nas propriedades hidráulicas dos geotêxteis, estes podem ser submetidos a testes de resistência a perfuração dinâmica, seguido de testes das propriedades hidráulicas. Duas características são fundamentais, uma vez que

governam as propriedades hidráulicas; permissividade $\psi(s^{-1})$ e o tamanho de abertura aparente (O_{95}, μm). O alongamento das amostras DRT submetidas a várias energias de impacto são medidas e recuperadas para realização do Teste de Permissividade e Teste de Ponto de Bolha para determinação da abertura aparente (CHEAH et al., 2017).

Apesar de alguns geotêxteis não apresentarem alteração, uma vez que o alinhamento das fibras nos geotêxteis afeta significativamente o tamanho dos poros em geotêxteis não tecidos, é possível identificar que a abertura de filtração (O_{95}) aumentam proporcionalmente a energia de queda, consistentes com o comportamento da permissividade (CHEAH et al., 2017).

Figura 2-Ensaio de perfuração dinâmica



Fonte: Modificado de Costa et al., (2008)

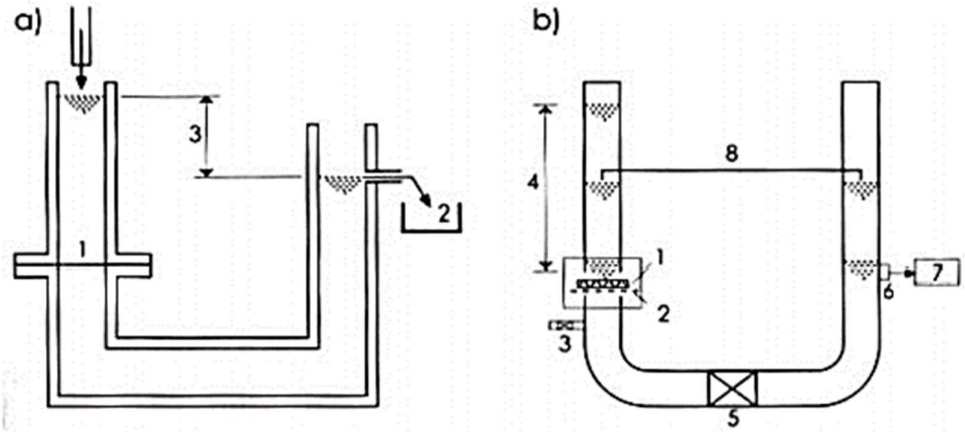
Cheah et al. (2017) aborda ainda em seu estudo o atendimento ao critério de retenção. Os danos de instalação culminam no aumento no tamanho da abertura e sugere aumentos de permissividade e possivelmente diminuição da retenção. No entanto, mesmo nos materiais seriamente danificado; eles ainda atendem ao critério de retenção.

Os geotêxteis alongam-se progressivamente até certo ponto, mas assim que atingem o "limite de ruptura" da fibra, o material para de se alongar excedendo seu limite plástico, resultando em rasgos e rupturas nas camadas de microfibra. A quebra interna dessas fibras possivelmente criará e/ou aumentará vazios internos, fazendo com que a permissividade dos geotêxteis aumente. Ou seja, é esperado que com o aumento da energia de queda aplicada durante a instalação resulte num maior alongamento e deformação, o que resulta no aumento da permissividade devido ao maior tamanho de poros e vazios (CHEAH et al., 2017).

Os geotêxteis e geocompostos drenantes apresentam uma permeabilidade normal ao plano (K), em geral, muito elevada, e sua determinação é semelhante à empregada em mecânica dos solos com o uso de permeâmetros de carga constante ou variável (BUENO; VILAR, 2015).

A Figura 3 exemplifica esquematicamente os dois tipos de determinação, carga variável e carga constante. O ensaio com carga constante a) onde: 1 – geotêxtil; 2 – coletor de água; 3 - ΔH. O ensaio de carga variável b) onde: 1 – geotêxtil; 2 – tela para suporte do corpo de prova; 3 – registro; 4 – altura inicial da coluna d'água; 5 – registro; 6 – transdutor de pressão; 7 – unidade de leitura digital; 8 –equilíbrio hidráulico ao final do ensaio (BUENO; VILAR, 2015).

Figura 3-Esquema do ensaio de permeabilidade normal e permissividade.



Fonte: Manual brasileiro de geossintéticos, modificado de Bueno e Vilar (2015)

A permissividade (ψ) pode ser obtida através do teste de carga constante que quantifica a passagem da água por um geotêxtil (normal a plano) e pode ser determinada seguindo a equação:

$$\psi = \frac{Qn}{A\Delta h} \qquad \text{Equação [2]}$$

Onde:

- ψ é a permissividade da amostra (s^{-1})
- Q é a vazão que passa pela amostra (m^3/s)
- n é o número de camadas de geotêxtil
- A corresponde a área da seção de geotêxtil exposto (m^2)
- Δh é a perda de carga (m)

Dessa forma, é possível obter o coeficiente de permissividade a partir da equação:

$$k = \psi t_g \qquad \text{Equação [3]}$$

Onde:

- k é o coeficiente de permeabilidade normal
- t_g corresponde a espessura do geotêxtil em metros.

Para avaliar os danos infligidos ao geotêxtil é necessário comparar a variação percentual dos coeficientes de permeabilidade normal da área do geotêxtil que apresenta dano crítico com a amostra de controle (CHEAH et al., 2017).

$$\Delta K(\%) = \frac{(k_{dc} - k_c)}{k_c} 100\% \qquad \text{Equação [4]}$$

Onde:

- ΔK é a variação percentual do coeficiente de permeabilidade
- K_{dc} é o coeficiente de permeabilidade normal na área de dano crítico
- K_c é o coeficiente de permeabilidade normal de controle.

Os poros no geotêxtil não tecido são de tamanhos variados e sua distribuição pode ser representada da mesma forma que a distribuição dos tamanhos das partículas no solo. No entanto, devido à forma, o arranjo dos filamentos e à compressibilidade da estrutura dos geotêxteis, as relações geométricas entre filamentos e vazios são mais complexas do que nos solos. Originalmente o termo adotado era Equivalent Opening Size (EOS), que nos Estados Unidos atualmente é chamado de Apparent Opening Size (AOS), enquanto nos países da Europa e no Canadá o termo usado é Filtration Opening Size (FOS). Ele é tomado como O_{98}, O_{95} ou O_{90} em diferentes partes do mundo e dependendo do processo para sua obtenção. O valor da abertura de filtração (O_f) do geotêxtil é usualmente assumido como o valor do maior grão que passou pelo geotêxtil em ensaios de abertura de filtração e está associada às dimensões dos poros e constrições no geotêxtil (TREJOS GALVIS, 2016).

Métodos diretos como a técnica de peneiramento, que pode ser dividida em três tipos: o peneiramento seco, no qual microesferas de vidro esféricas, e de tamanhos conhecidos, ou partículas de areia de quartzo calibradas são peneiradas em condição seca através de uma tela feita do espécime de geotêxtil, numa armação de peneira, por um período de tempo constante, geralmente 10 min. O O_{95} do geotêxtil é frequentemente medido com o método de peneiramento

a seco (ASTM D4751-21A, 2021), mas este teste é conhecido por falta de precisão e resulta predominantemente num tamanho de poro para geotêxtil não tecido (<75 μm). Sobre o peneiramento seco ainda recaem questionamentos como o efeito da eletricidade estática e número de ensaios, que influenciam a qualidade dos resultados. O peneiramento úmido consiste no peneiramento por vibração enquanto a água é jogada sobre as esferas ou partículas de areia. Já no peneiramento hidrodinâmico as partículas de areia ou esferas de vidro são depositadas sobre o espécime de geotêxtil, contido em um recipiente e, o conjunto é submetido ao fluxo alternado de água pela imersão e emersão repetidas e um tanque (CHEAH et al., 2017; TREJOS GALVIS, 2016).

Outro método para determinar as características do tamanho dos poros é por meio do teste do ponto de bolha (*Bubble point*). O teste do ponto de bolha mede o tamanho dos poros combinando medidas de tensão capilar e fluxo de ar através do espécime de geotêxtil por fluxo capilar; baseado no princípio de que o geotêxtil tem poros contínuos discretos de um lado ao outro do geotêxtil (CHEAH et al., 2017; GARDONI, 2000; GARDONI; PALMEIRA, 2000).

Os ensaios desenvolvidos por Cheah et al., (2017) comparando diversos tipos de geotêxteis demonstram que alguns materiais são mais susceptíveis a modificação dos parâmetros hidráulicos do que outros. Nos geotêxteis mais susceptíveis, as porções de geotêxteis que sofreram danos críticos apresentaram uma permissividade mais elevada que aquelas com danos intermediários e com as amostras de controle. Os dados demonstraram uma relação linear entre a permissividade do geotêxtil e a energia de puncionamento aplicada.

2.3.4. Degradação pelo meio ambiente

O meio ambiente pode promover a degradação dos geossintéticos ao longo de sua vida útil. A degradação ambiental manifesta-se através dos mecanismos de degradação química e biológica que atuam continuamente ao longo do tempo de serviço da estrutura (SIEIRA, 2003).

A degradação química compreende a transformação estrutural dos polímeros, resultante da ação de substâncias quimicamente ativas presentes no Solo. Os principais mecanismos de degradação química são a termo-oxidação, a foto-oxidação e a hidrólise (SIEIRA, 2003).

- A termo-oxidação é o mecanismo de oxidação ativado pelo calor. Os polímeros adotados em condições normais na geotecnia, geralmente, não apresentam problemas de estabilidade, no entanto, sob temperatura elevada, algumas

propriedades mecânicas podem sofrer alteração ao longo do tempo, especialmente a relação tensão-deformação.

- A foto-oxidação é um mecanismo oxidante ativado pela radiação ultravioleta. A ação da radiação UV atinge a superfície das fibras, tornando-as quebradiças e com menor resistência.
- A hidrólise consiste na ruptura das cadeias moleculares pela ação das moléculas de água. O processo de hidrólise pode ocasionar uma perda de massa molecular do polímero para o meio em que se encontra e uma erosão superficial das fibras do geossintético.

A degradação biológica é resultante da atividade de microrganismos (bactérias e fungos), que podem eventualmente se agregar à superfície dos geossintéticos, como os polímeros utilizados na fabricação dos geossintéticos possuem, em geral, peso molecular elevado, os geossintéticos apresentam resistência ao ataque microbiológico (SIEIRA, 2003).

Os fatores intervenientes no processo que conduzem o processo de degradação ambiental do geossintético, são oriundos da composição do solo e fluido em contato com o geossintético, tais como o pH do meio, a presença de íons metálicos e de matéria orgânica, a pressão parcial de oxigênio, o teor de umidade e a temperatura do meio (SIEIRA, 2003).

Quando produzidos e estabilizados corretamente, os geossintéticos resistem a ataques químicos e microbiológicos do ambiente durante a vida útil da obra. No entanto, para essas aplicações é necessária a realização de ensaios de seleção ou de identificação, que determine as condições em que o geossintético será requerido, seja em função da sua aplicação ou das condições que o rodeiam (LOPES P; LOPES L, 2010).

A Tabela 2 apresenta um resumo da resistência de diversos polímeros à degradação ambiental.

Tabela 2-Resistência de diversos polímeros à degradação ambiental

Tipos de degradação		**PP**	**PET**	**PEAD**	**PA**
Degradação química	álcalis	2 a 3	1	3	2
	ácidos	3	2	3	1
Foto-oxidação	com tratamento	3	3	3	2
	sem tratamento	1	1	1	1
Hidrólise		1	0 a 1	2	1
Termo-oxidação		0	3	1	2
Degradação biológica		2	2	3	2
Legenda: 3 - resistência muito elevada; 2 - elevada; 1 - média; 0 - baixa					

Nota: PP polipropileno, PET polietileno tereftalato, PEAD polietileno de alta densidade, PA poliamida
Fonte: modificado de Sieira, (2003)

Lopes P. e Lopes L. (2010) expõe que a avaliação da durabilidade dos materiais é feita, primeiro distinguindo aplicações de reforço das demais, uma vez que esta utilização exige ensaios específicos para cada condição de obra. Nas condições normais de serviço: tempo de utilização menor que 25 anos, pH entre 4 e 9, temperatura do solo inferior a 25ºC, e solo natural sem contaminantes os geossintéticos apresentam baixa degradação. Para condições de serviço diferentes destas, os fatores de redução devem ser reavaliados simulando a condição de obra.

2.3.5. Mecanismos de colmatação de filtros geotêxteis

Um filtro geotêxtil, assim como um filtro granular, deve ser capaz de bloquear o material granular fino, mas deve permitir o fluxo de água suficiente através do geotêxtil. O fluxo de água através de um geotêxtil é dado em função da carga hidráulica. No entanto, a permeabilidade real normal ao plano de um geotêxtil em areia ou material granular é muito menor do que a medida no teste de índice em função do bloqueamento parcial das aberturas do geotêxtil (BEZUIJEN; PILARCZYK, 2012).

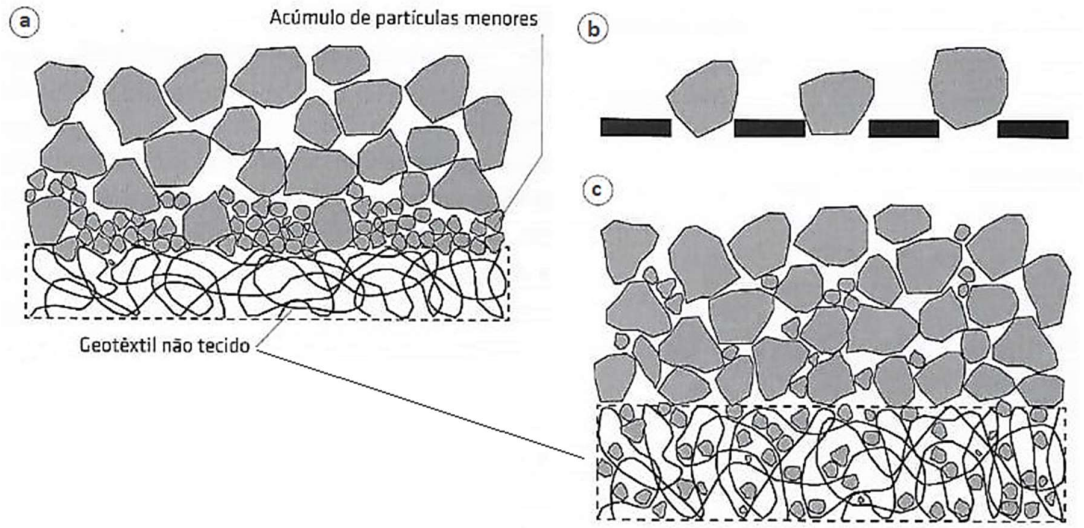
As partículas transportadas pelo fluxo de água podem penetrar o geotêxtil, passar através do filtro e migrar para dentro da estrutura drenante. Se isto for previsto, o dreno poderá acomodar estas partículas. No entanto, se as partículas ficam retidas no filtro, elas interagem com o filtro de três formas diferentes dispostos na Figura 4 (LAFLEUR, 1999; GARDONI, 2000; PALMEIRA, 2018):

Segundo Palmeira, (2018), basicamente, existem três mecanismos de colmatação de filtros geotêxteis:

- **O mecanismo de cegamento:** consiste no acúmulo de partículas de solo com dimensões menores que as aberturas do filtro sobre sua superfície. Tal mecanismo ocorre principalmente em solos internamente instáveis, sujeitos ao fenômeno de sufusão. A incompatibilidade entre o solo e o filtro acaba resultando na formação da camada de baixa permeabilidade sobre o filtro.
- **O mecanismo de bloqueamento:** o mecanismo é caracterizado pelo bloqueio das aberturas do geotêxtil por partículas do solo. Tal mecanismo seria estatisticamente improvável em um geotêxtil do tipo não tecido, devido à quantidade de aberturas destes, sendo encontrado comumente em geotêxteis tecidos
- **Obstrução dos poros do geotêxtil:** pode surgir em decorrência da impregnação por partículas do solo. Geralmente essa impregnação ocorre em decorrência do

espalhamento de solos finos não coesivos sobre o filtro; por partículas finas trazidas pelo fluido; formação de colônias de bactérias; precipitação de compostos químicos, que culminam na obstrução dos poros do geotêxtil.

Figura 4-Mecanismos de colmatação de filtros geotêxteis.



Fonte: Modificado de Palmeira, (2018)

2.3.6. Permissividade e Transmissividade

Segundo Palmeira, (2018) a permissividade de um elemento filtrante corresponde a capacidade deste elemento de permitir a passagem do fluido normal ao plano de instalação satisfatoriamente e sem causar aumento de poropressão no maciço.

Para Bezuijen e Pilarczyk (2012) é comum encontrar os termos permissividade e permeabilidade confundidos. Entretanto estes são termos distintos e a permeabilidade não é o parâmetro mais útil para determinar o quão permeável é um geotêxtil. O termo permeabilidade é baseado na Lei de Darcy;

$$v = ki \qquad \text{Equação [5]}$$

Onde;

- v é a velocidade do fluxo
- k é a permeabilidade
- i é o gradiente hidráulico

Mas o gradiente hidráulico não é realmente de interesse. O que interessa é se existe ou não uma queda na carga piezométrica sobre o geotêxtil ($\Delta\varphi$), portanto a relação de interesse é:

$$v = \psi . \Delta\varphi$$ Equação [6]

Onde;

- ψ é a permissividade (1 / s).
- Δφ é a variação da carga piezométrica

A relação de permeabilidade sugere que um geotêxtil 2 vezes mais espesso levaria a uma queda 2 vezes maior na cabeça piezométrica (como é o caso da areia onde Darcy é válido e está correto). No entanto, os exemplos de medições mostrados antes mostram que o quão permeável um geotêxtil será em uma estrutura não é determinado por sua espessura, mas pela interação entre o geotêxtil e o material granular. Alterar a espessura do geotêxtil em uma estrutura provavelmente terá apenas uma influência limitada ou nenhuma influência sobre o quão permeável ele é. Consequentemente, a permissividade representa melhor o comportamento real do geotêxtil em uma construção de filtro.

A transmissividade, corresponde a propriedade do geossintético, quando este é responsável por conduzir o fluido por toda a sua extensão até o local de destino. Sendo necessário possuir valor de transmissividade suficiente para transportar o fluido de forma desimpedida e sem trabalhar sob pressão.

2.4. Cortinas de turbidez (*silt curtain*)

As cortinas de turbidez (*floating silt curtain*) são estruturas desenvolvidas para contenção e controle na dispersão de partículas em corpos hídricos (Unique Group, 2020). Originalmente idealizadas para conter plumas de sólidos suspensos, em construções marinhas, também é utilizada com o objetivo de reduzir os custos com produtos químicos na gestão do lodo em ETA - Estações de Tratamento de Água (OLIVEIRA et al., 2020a)

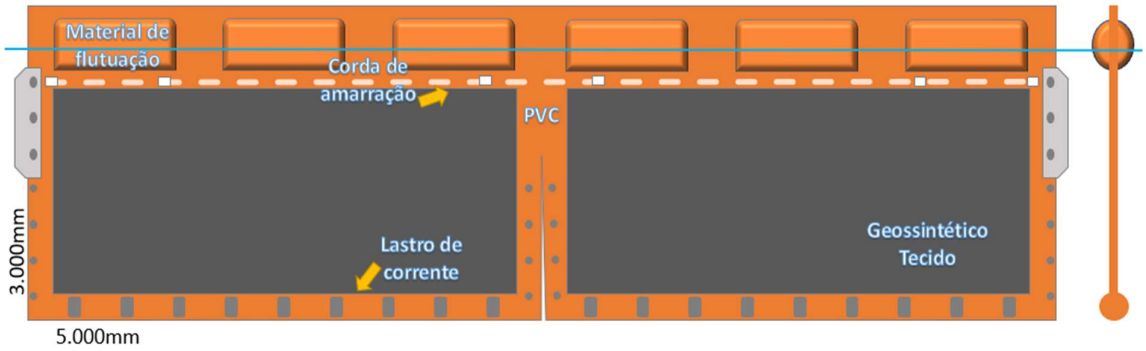
Segundo Francingues e Palermo (2005), as cortinas de turbidez são consideradas como uma das melhores práticas de gerenciamento de impactos a recursos hídricos sensíveis, infelizmente, os fatores que contribuem para a eficácia das cortinas em diferentes circunstâncias são mal compreendidos e culminam no entendimento de que, as cortinas de turbidez não funcionam em muitas das condições.

As cortinas são encontradas com diversos nomes na literatura, como barreiras de turbidez, *sea fence*, s*ilt curtains,* cortinas de turbidez, cortinas de silte e suas derivações. No geral, as cortinas de turbidez são estruturas verticais e flexíveis que se estendem para baixo a partir da

superfície da água até uma profundidade de água especificada. Normalmente fabricada em tecido termoplástico (vinil) reforçado com poliéster, a cortina é mantida em uma posição vertical por material de flutuação na parte superior e uma corrente de lastro na parte inferior (FRANCINGUES; PALERMO, 2005)

Essas cortinas podem ser fabricadas para uma variedade de profundidades. Normalmente o projeto de uma cortina de turbidez inclui quatro elementos (como mostrado na Figura 5): uma saia em tecido que forma a cortina, seguimentos de flutuação no topo, lastro na parte inferior, para dar peso e manter a verticalidade da cortina. Geralmente um cabo de tensão é adicionado separadamente para absorver as tensões longitudinais impostas à cortina devido ao arrasto do fluxo, enquanto permite que a cortina se alargue aliviando a pressão hidrodinâmica. Em alguns casos a saia absorve esta carga e o cabo de tensão não é incluído (JOHANSON, 1978).

Figura 5-Seção com elementos da cortina de turbidez



Fonte: Modificado de Francingues e Palermo (2005).

As cortinas são geralmente fabricadas em seções padrão (por exemplo, até 15 metros) que podem ser unidas para fornecer uma cortina de comprimento especificado. As cortinas são geralmente implantadas entre 0,3 e 0,6 m acima do fundo para permitir que o fluxo de lama passe por baixo delas. As linhas são ancoradas e mantêm a cortina em uma configuração de implantação que pode ser em forma de U ou V, circular ou elíptica, dependendo da aplicação (FRANCINGUES; PALERMO, 2005)

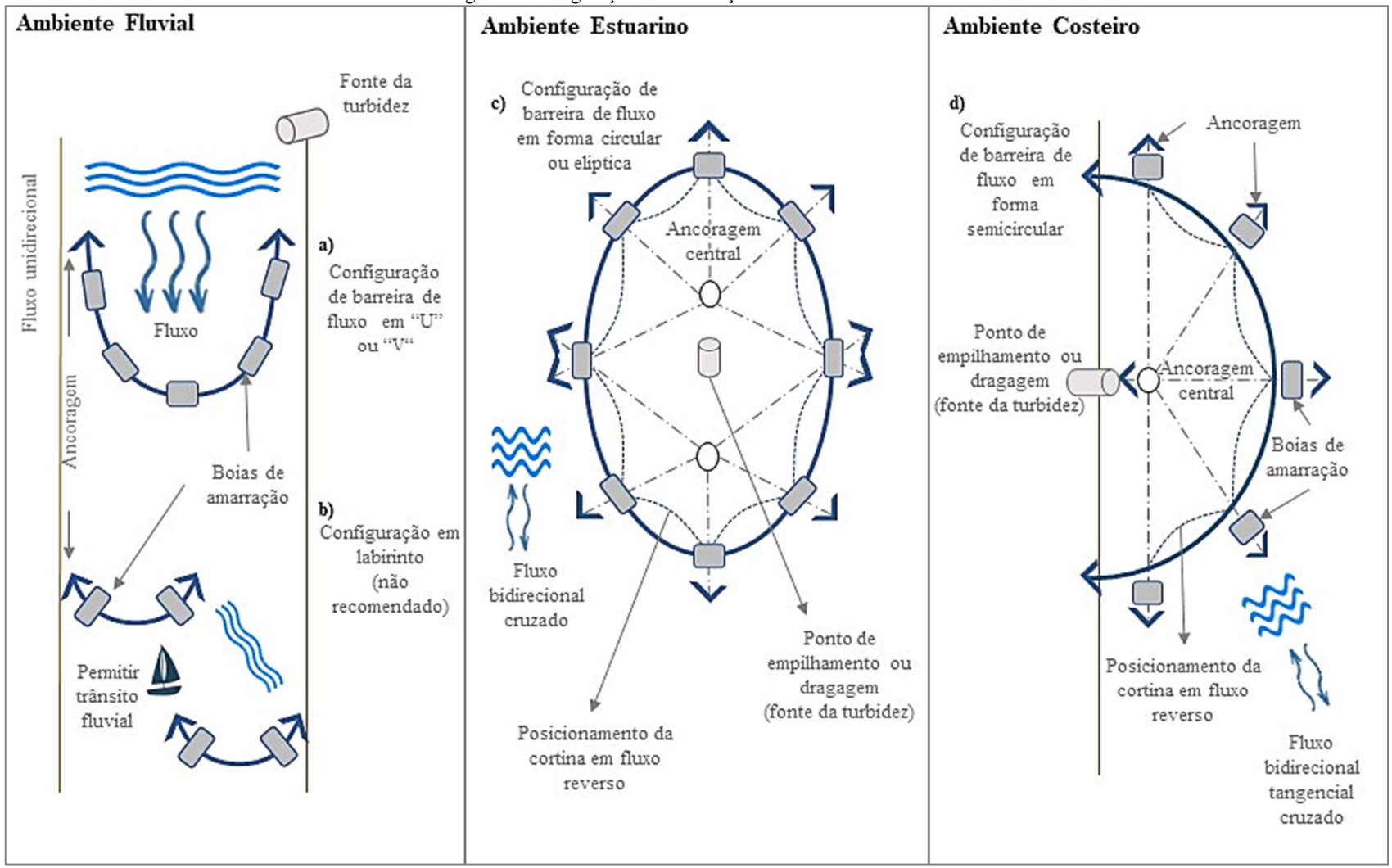
Embora a cortina forneça um invólucro onde parte do material de granulação fina pode flocular e/ou sedimentar, a maior parte desse material suspenso de granulação fina na coluna de água escapa com o fluxo de água e fluido sob a cortina. A cortina de turbidez não contém indefinidamente água turva, mas em vez disso, controla a dispersão de água turva desviando o fluxo sob a cortina, minimizando assim a turbidez na coluna de água fora da cortina de silte (FRANCINGUES; PALERMO, 2005)

Segundo Francingues e Palermo (2005), uma vez que as cortinas de turbidez sejam devidamente implantadas e mantidas, a estrutura pode controlar efetivamente a distribuição de turbidez na água. No entanto, as cortinas de turbidez não são projetadas para conter ou controlar a lama fluida. Uma vez que o acúmulo de lama fluida pode atingir a profundidade da corrente de lastro ao longo da borda inferior da saia, devendo a cortina ser afastada do ponto de descarga, caso contrário, o acúmulo de sedimentos pode puxar a cortina para dentro da água e, eventualmente, enterrá-la. Consequentemente, a taxa de acúmulo de lama fluida em relação às mudanças na profundidade da água deve ser considerada durante uma operação de uma cortina de turbidez.

Após o levantamento do local de implantação, a geometria da cortina implantada deve ser determinada com base nos objetivos da aplicação da cortina de turbidez, o regime hidrodinâmico no local do projeto e fatores como o tráfego de barcos(FRANCINGUES; PALERMO, 2005).

As configurações de implantação típicas para cortinas de turbidez são mostradas na Figura 6. Em rios ou canais, nos quais não existe a inversão de fluxo a adoção de uma configuração em U é aceitável (Figura 6-a). Caso o corpo hídrico seja utilizado por embarcações deve-se adotar a configuração em labirinto, no entanto, essa configuração é relativamente ineficaz devido ao fluxo direto através da abertura entre as seções da cortina (Figura 6-b). Em obras inseridas em ambientes com presença de correntes reversas, é necessária a adoção de uma configuração circular ou elíptica (Figura 6-c), que requer um sistema de amarração mais extenso. Em situações em que a água turva está sendo gerada por um efluente de uma área de contenção ou uma operação de descarte de tubulação próxima à costa, a cortina pode ser ancorada em uma configuração semicircular ou U (Figura 6-b) com as extremidades da cortina ancoradas em terra aproximadamente equidistantes do ponto de descarga.

Figura 6-Configurações de instalação de cortinas de turbidez



Fonte: modificado de Johanson (1978)

Para Johanson, (1978) o geotêxtil tecido que compõe a saia da cortina deve apresentar propriedades específicas em função das características de implantação dos projetos. Dentre elas, propriedades anti-incrustantes, resistência à luz ultravioleta e ao mofo, além da facilidade de limpeza. A propriedade anti-incrustante é importante em locais que apresente alto risco de precipitação química e/ou crescimento extensivo de microrganismos uma vez que as cortinas de turbidez permanecem na água por longos períodos. Como as cortinas são usadas ao ar livre e geralmente armazenadas ao ar livre, o tecido não deve se deteriorar devido aos efeitos da radiação ultravioleta (UV). Outro aspecto importante é a resistência ao mofo porque as cortinas são frequentemente dobradas e armazenadas enquanto molhadas.

A flutuabilidade é uma característica importante das cortinas de turbidez, uma vez que se deve manter o calado de saia especificado e fornecer uma barreira contínua acima da linha de água. Geralmente são adotadas razões de flutuabilidade variando de 5 a 10 vezes o peso total da cortina, uma vez que a reserva de flutuabilidade visa garantir uma barreira contínua sob as condições esperadas de vento e ondas. O material de flutuação geralmente é colocado em bolsões dentro da cortina. Geralmente tem a forma cilíndrica de espuma sólida ou de células fechadas, para que a flutuabilidade não seja perdida se o bolso da cortina for perfurado ou rasgado. Cada segmento de flutuação deve ter um comprimento máximo 3m para que a cortina possa ser facilmente dobrada para armazenamento e transporte (JOHANSON, 1978).

O lastro faz com que a saia penda verticalmente da flutuação. Idealmente, o peso do lastro é suficiente para garantir que a cortina ficará pendurada verticalmente sob corrente moderada (por exemplo, ≈ 0,257m/s), mas irá se alargar para aliviar a tensão sob corrente excessiva (por exemplo, ≈ 1,029m/s). Normalmente são adotas correntes galvanizadas, por se tratar de um material resistente a corrosão. Em alguns projetos de cortina em que a corrente de lastro também atua como um membro de tensão, a corrente deve ser examinada com frequência para verificar se há corrosão (JOHANSON, 1978)

Em condições de correntes significativas ou que precise de reboque da cortina é necessário adotar um componente de tensão que irá absorver as forças impostas à cortina nesses cenários, além de apresentar resistência a corrosão quando a aplicação for em águas salinas. As maiores forças que atuam sobre o sistema ocorrem quando a cortina é ancorada perpendicularmente a uma corrente. Dessa forma três critérios de interesse são considerados na avaliação do componente de tensão, são: material, localização na cortina e o nó de conexão do

componente de tensão entre as seções. (FRANCINGUES; PALERMO, 2005; JOHANSON, 1978)

A concepção do projeto de uma cortina considera desde a metodologia construtiva aos materiais a serem adotados na confecção, sendo que o somatório desses fatores influencia diretamente no componente de tensão que será adotado na cortina, sendo assim o componente de tensão pode ser avaliado em dois cenários principais.

O primeiro cenário utiliza o próprio tecido pode absorver totalmente o estresse de instalação e do ambiente. No entanto, existem algumas desvantagens potenciais para este método. Se o conector final for aparafusado diretamente ao tecido da cortina, as concentrações de tensões nesses orifícios sempre que a cortina estiver sob tensão, elevam o risco de que o conector rasgue a cortina. Em segundo lugar, embora o tecido possa ser forte o suficiente para o uso normal esperado, durante as tempestades ele estará sujeito a tensões muito altas e a cortina pode se romper. Em terceiro lugar, o tecido (náilon ou poliéster) pode esticar até 30% sob altas tensões. Esta quantidade de alongamento da cortina pode permitir que a cortina se desloque e interfira com equipamentos ou operações nas proximidades. A única vantagem de usar o tecido como único elemento de tensão é que a construção da cortina é mais simples e menos dispendiosa.

Um segundo cenário para que o sistema suporte as tensões impostas consiste em transferir as forças para um componente de tensão separado da cortina, a exemplo de um cabo de aço galvanizado ou de aço inoxidável. Quando o componente de tensão é um cabo separado, ele deve ser ligeiramente mais curto do que a cortina, e o tecido e o membro de tensão devem ser conectados de maneira que o tecido fique livre para deslizar no cabo. A vantagem deste método é que o componente de tensão absorve a maior parte da carga de tensão em todas as configurações e melhora a expectativa de vida do tecido. Esta vantagem também é válida quando o componente de tensão é própria corrente de lastro, no entanto, nesse caso as variações do nível da água no reservatório devem ser avaliadas, evitando que a água turva passe sobre a cortina, ou que o fluxo de lama atinja a saia (ex. variação de marés). Com uma corrente ou cabo de aço, o tecido absorve um pouco da carga de tensão e, sob condições de alta corrente, ele se alarga para aliviar parte da tensão na corrente de lastro ou cabo de aço.

A localização do componente de tensão varia de acordo com o modelo de cortina especificado e as características da obra. Os locais disponíveis para instalação do componente de tensão são logo abaixo da flutuação, 30cm abaixo da flutuação e na parte intermediária ou

inferior da saia. Para condições de baixas correntes, como um pequeno lago ou lagoa, um componente de tensão separado da cortina não é necessário. Em correntes moderadas, o componente de tensão separado e localizado acima ou ligeiramente abaixo da flutuação é aceitável. Para situações de alta corrente, o cabo de tensão é recomendado e deve ser alocado acima, ou abaixo da flutuação, ou próximo ao centro vertical da saia. A cortina se alargará para aliviar a tensão em qualquer configuração, entretanto a configuração de tensão central alarga menos e mantém maior profundidade de saia efetiva do que a configuração de tensão superior para uma dada corrente, mas como resultado, requer o dimensionamento de componente de tensão mais fortes e sistemas de ancoragem mais eficazes para absorver a maior carga (JOHANSON, 1978).

Para compor toda a extensão do projeto são utilizados conectores ou terminais projetados de tal forma a permitir que as seções de cortina sejam fixadas ou desengatadas facilmente e fornecer uma vedação de água entre as seções evitando vazamentos. Os dois principais tipos de conectores são os conectores sem carga e com carga (JOHANSON, 1978).

Nos conectores sem carga, os cabos de tensão são presos uns aos outros separadamente dos conectores da cortina, desviando desses elementos. Três exemplos desse tipo de conector são a relinga (corda trançada e costurada no tecido da cortina), zíper de plástico e material de velcro. Os conectores sem carga devem fornecer a transferência de tensão entre as seções da cortina, bem como a vedação entre as seções do tecido. No entanto, os conectores sem carga frequentemente permitem o vazamento através de fendas entre as seções das cortinas. Com o aumento das correntes, a cortina começa a se alargar e uma tensão considerável pode ser aplicada aos conectores sem carga devido à mudança na forma da cortina facilitando a abertura dos conectores (JOHANSON, 1978).

Já nos conectores com carga os componentes de tensão presos à cortina, também são fixados aos conectores, que são capazes de suportar as cargas esperadas e irão transferir a tensão entre as seções da cortina. Os três exemplos mais comuns são a corda trançada através de ilhós, ilhós grampeado com porcas e parafusos e conectores de extrusão de alumínio, sendo este último o preferível para qualquer instalação da cortina em condições de corrente por evitar vazamentos em condições adversas. Outros tipos de conectores podem ser utilizados em ambientes onde não há corrente atuante (JOHANSON, 1978).

2.4.1. Aspectos hidrodinâmicos

As cortinas de turbidez são afetadas por diferentes cargas hidrodinâmicas e muitas das vezes, para o correto dimensionamento, é necessário avalia a combinação dessas cargas que atuam sobre o sistema de cortinas (PILARCZYK, 2000).

Cenários de cargas hidrodinâmicas:

1. Regime estacionário
2. Regime cíclico ou por batelada
3. Regime de ondas
4. Oscilações e vibrações (forças oscilantes)
5. Ventos atuantes sobre os flutuadores
6. Variação de densidade e sedimentos em suspensão

As condições de dimensionamento de uma cortina partem de uma combinação das forças contidas nos cenários de 1 a 5 mencionados e eventualmente o cenário 6. Em todos os cenários é indispensável considerar que cada elemento da cortina de turbidez apresenta densidade e elasticidade uniformes e que todas as forças são transferidas ao terreno natural través do sistema de ancoragem. Um aspecto que deve ser considerado corresponde a variação de permeabilidade de uma cortina ao longo do tempo. Uma cortina pode reduzir sua permeabilidade tornando-se impermeável pelo crescimento de vegetação, incrustação ou colmatação por exemplo (PILARCZYK, 2000).

2.4.2. Limitações das cortinas de turbidez

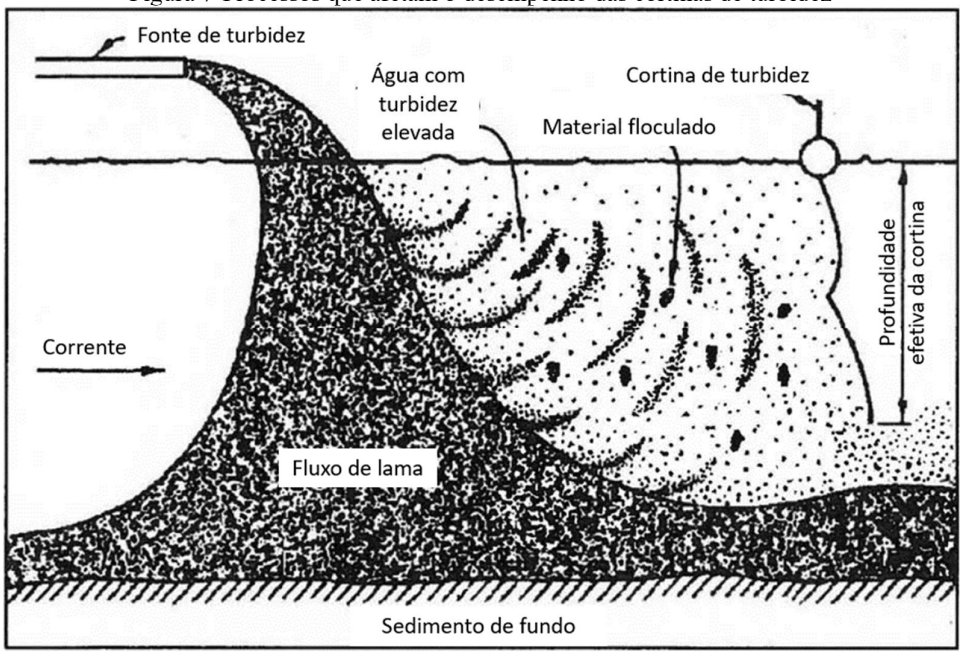
Poucas aplicações de cortina de turbidez são semelhantes. Cada projeto é único e requer aplicações e adaptações específicas do local. As cortinas devem ser selecionadas, projetadas e instaladas para atender aos requisitos de licença e certificação de qualidade da água, quando aplicável.

Uma das limitações das cortinas se dá pelo fato dessas estruturas não serem projetadas para conter indefinidamente a água turva ou controlar a lama fluida, mas sim controla a dispersão da água turva, desviando o fluxo sob a cortina, favorecendo o processo de sedimentação. Dessa forma, recomenda-se que as cortinas sejam posicionadas entre 0,3m e 0,6m acima do fundo da estrutura, permitindo o fluxo de lama abaixo da cortina. O acúmulo de lama ao atingir a profundidade da corrente de lastro ao longo da borda inferior da saia pode

puxar a cortina para dentro da água e, eventualmente, enterrando-a. Com o intuito de evitar tal cenário, a taxa de acúmulo de lama fluida em relação às mudanças na profundidade da água deve ser considerada durante uma operação de uma cortina de turbidez que deve ser afastada do ponto de descarga e reposicionada sempre que necessário (FRANCINGUES; PALERMO, 2005).

Em muitos casos em que as cortinas são usadas, a concentração de sólidos suspensos dentro do invólucro da cortina pode ser relativamente alta (ou seja, superior a 1,0 g/L). No caso de uma operação típica de descarte de dutos, cercada por uma cortina de turbidez (Figura 7), com concentrações altas de sólidos em suspensão, a grande maioria do material (95% - fração mais grosseira ou floculada) rapidamente decanta para o fundo, onde é depositado e forma uma camada de lama fluida que se afasta da fonte em um gradiente aproximado de 1:200. Os outros 5% do material permanecem suspensos na coluna de água acima da camada de lama fluida e são responsáveis pela aparência turva da água dentro da cortina. Enquanto a cortina fornecer um invólucro as partículas finas podem flocular e/ou assentar, mas a maior parte desse material suspenso na coluna de água escapa com o fluxo de água e fluido sob a cortina (FRANCINGUES; PALERMO, 2005).

Figura 7-Processos que afetam o desempenho das cortinas de turbidez



Fonte: Modificado de Johanson (1978)

Em alguns casos, os níveis de turbidez na coluna de água fora da cortina podem ser 80-90 por cento mais baixos do que os níveis dentro ou de corrente ascendente do invólucro da cortina. No entanto, altas correntes e ambientes de alta energia fazem com que as cortinas se

abram, reduzindo assim a profundidade efetiva da cortina. Uma cortina com saia de 1,5m exposta a uma corrente de 0,5m/s reduz a sua profundidade efetiva para 0,9m de profundidade. O aumento da turbulência ao redor da cortina também tende a causar a ressuspensão da camada de lama fluida e pode causar um aumento dos níveis de turbidez na coluna de água sobrenadante fora da cortina (FRANCINGUES; PALERMO, 2005).

Quando as correntes cruzadas, ou correntes de maré, dominam o regime hidrodinâmico, são constantes as mudanças de direção do fluxo. E caso a ancoragem não seja corretamente dimensionada as mudanças na direção da corrente dominarão a direção e o movimento (*flapping*) da cortina e provavelmente causam perturbação da lama fluida voltando a suspender sedimentos à medida que a cortina varre para frente e para trás a lama fluida sob a cortina. Com mudanças na direção das correntes de maré, os níveis de turbidez fora da cortina podem ser maiores (até 10 vezes) do que os níveis dentro da cortina (FRANCINGUES; PALERMO, 2005).

Sendo assim, as cortinas de turbidez não são recomendadas nas seguintes condições:

- Operações em mar aberto.
- Operações onde as correntes excedem 0,5m/s.
- Em áreas frequentemente expostas a ventos fortes e grandes ondas quebrando.
- Em áreas onde o movimento frequente da cortina pode ser necessário

2.5. Cortinas de controle de sedimentos (*silt fence*)

Segundo Richardson e Middlebrooks, (1991), a aplicação mais comum das *silt fence* é controlar o fluxo de sedimentos que saem de novos locais de construção. Como tal, são estruturas temporárias com vida útil menor que 6 meses e que para simplificar o método de projeto deve-se considerar que a área fonte permanece sem vegetação durante o intervalo de tempo de utilização do dispositivo.

Os dispositivos de controle de sedimentos são limitados a aplicações onde a erosão ocorre na forma de erosão laminar e onde não há acúmulo de água fluindo para a barreira. Para garantir tais condições, a velocidade de escoamento da água que atinge o *silt fence* deve ser inferior a 0,3m/s. A velocidade do fluxo da água superficial é uma função da inclinação do declive, do comprimento do declive e da suavidade da superfície do terreno. Fazendo uma suposição conservadora de que a superfície do solo é lisa, a velocidade do fluxo da água superficial pode

ser limitada pela redução do comprimento do declive à medida que a inclinação do declive aumenta, conforme indicado na Tabela 3.

Tabela 3-Inclinação do terreno vs o comprimento máximo para instalação de uma silt fence

Inclinação do terreno (%)	Comprimento máximo (m)
<2	30.48
2-5	22.86
5-10	15.24
10-20	7.62
>20	4.57

Fonte: Modificado de Richardson e Middlebrooks (1991),

Ou seja, a área de drenagem de um fluxo terrestre para uma *silt fence* é limitada a 1.000m em declividade por 30 m de cerca. Maiores comprimentos de inclinação podem ser usados se saídas não erosivas forem fornecidas como parte da barreira de sedimentos(RICHARDSON; MIDDLEBROOKS, 1991).

O volume de sedimentos mobilizados pelas chuvas durante os 6 meses de vida, projetados para as cortinas de sedimentos, podem ser estimados pela equação universal de perda de solo (USLE), expressa por (RICHARDSON; MIDDLEBROOKS, 1991):

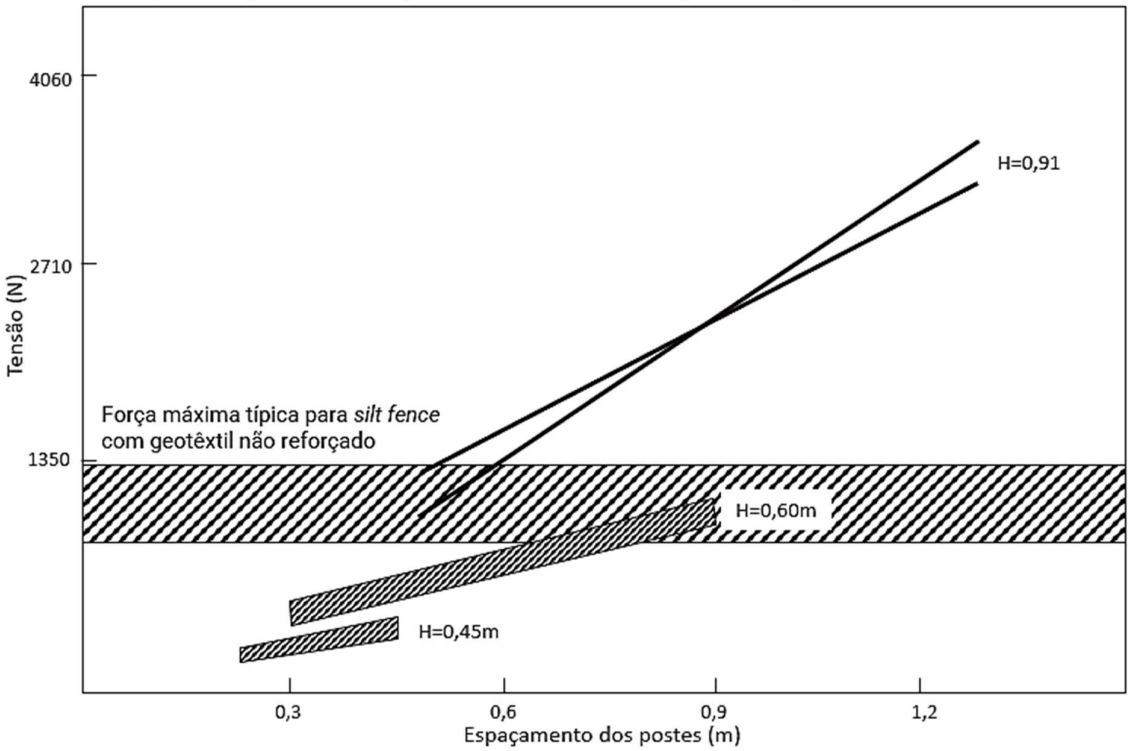
$$A = RKL_sCP \qquad \text{Equação [7]}$$

Onde;

- A é a perda de solo (ton/m²/ano)
- R é a taxa de erosão da chuva (ton/m³)
- K é o fator de erodibilidade (m³/ano)
- L_s é o fator entre a declividade e o comprimento da drenagem (m^{-2})
- C é o fator de cobertura vegetal (-)
- P é o fator de práticas de controle do solo (-)

O geotêxtil utilizado na construção de uma barreira deve ser suficientemente resistente para não rebentar sob a carga aplicada pela água e sedimentos acumulados. Esta resistência mínima é função da altura do represamento e do espaçamento dos postes que sustentam a cerca (Figura 8).

Figura 8-Espaçamento dos postes em função da força aplicada ao geotêxtil na silt fence.



Fonte: Modificado de Richardson e Middlebrooks (1991)

As demandas físicas atuantes nos postes da silt fence também aumentam com o aumento da altura da estrutura e do espaçamento entre os postes, conforme mostrado na Figura 9. Em geral, os problemas relacionados aos postes não são encontrados se a altura da cerca for inferior a 90 cm, o espaçamento entre os postes for de 1 m, e a profundidade mínima de cravação dos postes for de 40 cm

O geotêxtil deve atender às especificações mínimas definidas da seguinte forma:

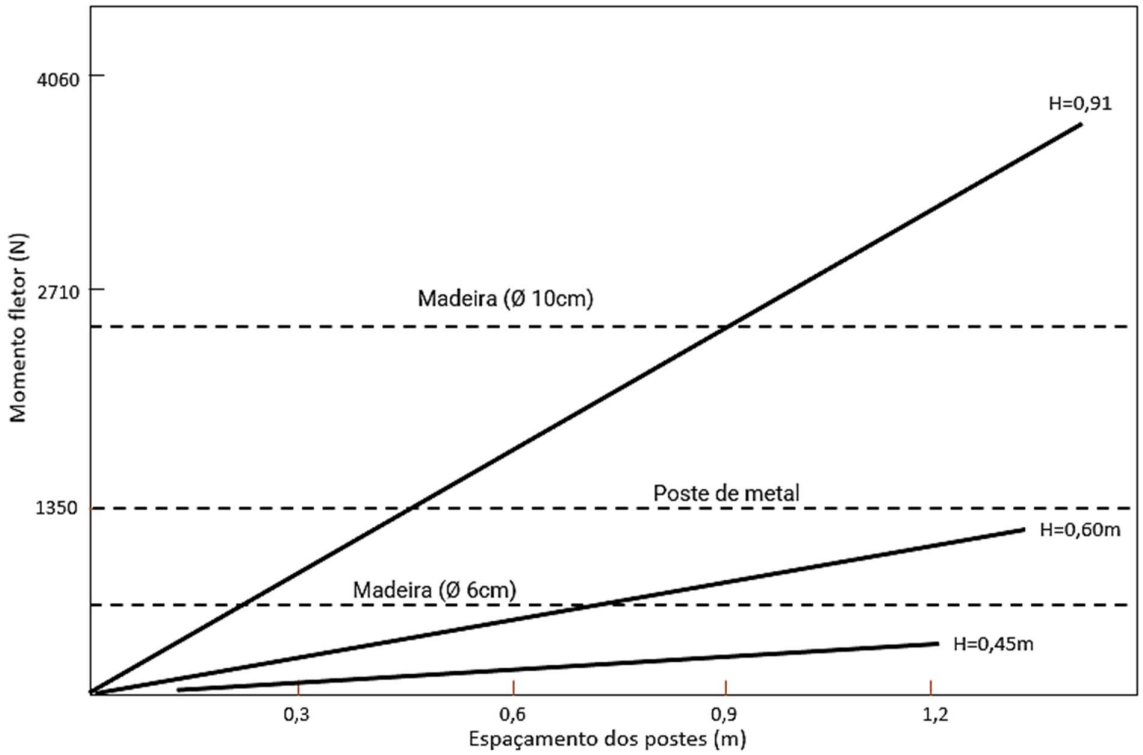
Tabela 4-Requisitos mínimos adotados aos geotêxteis aplicáveis nas silt fence.

Propriedades do geotêxtil	Mínimo requerido	Método de ensaio sugerido
Resistência a tração (GRAB)	0.4 kN/m	ASTM D1682
Alongamento até a falha	50%	ASTM D1682
Puncionamento	0.18kN/m	ASTM D751
Abertura de filtração equivalente	40-80	CW-02215
Resistência a radiação ultravioleta	90%	ASTM 9-26

Fonte: Modificado de Richardson e Middlebrooks (1991)

A Figura 9 mostra a resistência à tração geotêxtil necessária para uma variedade de alturas de represamento e espaçamentos entre postes.

Figura 9-Requisitos físicos vs espaçamento dos postes de uma silt fence.



Fonte: Modificado de Richardson e Middlebrooks (1991)

Segundo Richardson e Middlebrooks (1991), as diretrizes gerais de construção para *silt fences* são listadas a seguir:

- O geotêxtil utilizado como filtro deve partir de um rolo contínuo cortado no comprimento da barreira para evitar juntas
- Os postes de madeira ou aço são colocados em linha em um espaçamento determinado a partir da Figura 9. Em geral, o espaçamento deve ser inferior a 3 vezes a altura da cerca.
- A parte inferior do geotêxtil deve ser posicionado a montante da estrutura e ancorado em uma trincheira de solo ou cascalho.
- A estrutura não deve ser instalada em córregos, valas ou cursos d'água.
- As extremidades das cercas devem seguir o contorno do terreno de tal maneira que o fluxo ao redor das extremidades da cerca seja impedido.
- Se a cerca for galgada, providencie saídas estabilizadas para proteger o sistema da cerca.

2.6. Ensaio de tração

As propriedades mecânicas dos geossintéticos influenciam em sua vida útil e podem ser conhecidos tanto em laboratório quanto por meio de ensaios de campo. O ensaio de tração é um teste analítico no qual determina-se as propriedades mecânicas de um corpo de prova, de geometria conhecida, aplicando uma carga uniaxial crescente até sua ruptura. As cargas são registradas durante intervalos de tempo obtendo-se a curva tensão-deformação (ASTM D5035-11, 2019).

Para realização do ensaio a amostra é presa ao equipamento de forma centralizada com a direção mais longa do corpo de prova o mais paralela possível a direção da aplicação da força, certificando-se que a tensão na amostra é uniforme em toda a largura fixada. O alongamento do corpo de prova depende do comprimento inicial da amostra, sendo assim, qualquer pretensão aplicada na montagem do corpo de prova na máquina pode afetar o alongamento. Nos casos em que o alongamento é uma informação a ser coletada, uma pretensão uniforme de 0,5% da escala de força do equipamento é aplicada na amostra (ASTM D5035-11, 2019).

O ensaio de tração permite a obtenção de dois parâmetros dos geotêxteis:

- Força de ruptura - força máxima exercida na amostra lida diretamente no mecanismo indicador da máquina de teste.
- Medição do alongamento aparente – valor obtido medindo o aumento do comprimento a partir do início da curva de força-extensão até um ponto correspondente à força de ruptura.

2.7. Microscopia ótica e eletrônica de varredura

O microscópio é um instrumento utilizado para ampliar e observar estruturas pequenas que dificilmente são visíveis olho nú e contribuiu enormemente para o progresso do conhecimento e mudanças de paradigmas na ciência. O microscópio ótico utiliza luz visível e um sistema de lentes de vidro que ampliam a imagem das amostras. O microscópio foi inventado por Antony van Leeuwenhoek (1632 – 1713), aprimorado por Giovanni Faber em 1625 e por Hooke em 1665 (MOREIRA, 2013).

Os microscópios atuais usam luz transmitida que pode regular a intensidade da luz diretamente através do reóstato que atua na própria fonte luminosa ou indiretamente através do condensador e de um diafragma. A ampliação, dada pelo número de vezes que a imagem é

aumentada em relação ao objeto real, é dado em função do produto do poder de ampliação da objetiva e ocular utilizadas. A imagem observada também depende da resolução, isto é, a capacidade que as lentes têm de discriminar objetos muito próximos(MOREIRA, 2013).

Figura 10-Microscópio ótico usado na pesquisa, com zoom máximo de 30x.



Fonte: Acervo pessoal

Um microscópio eletrônico de varredura (MEV) utiliza um feixe de elétrons no lugar de fótons, sob uma voltagem suficientemente grande é possível elevar a resolução da imagem tal qual uma fonte de iluminação. Outro ponto de destaque é que, devido às suas cargas, os elétrons podem ser focalizados por campos eletrostáticos ou eletromagnéticos permitindo formar imagens(DEDAVID; GOMES; MACHADO, 2007).

Devido à necessidade de interação do feixe eletrônico com a amostra é necessário que as amostras sejam condutoras. Caso isto não ocorra, é possível torná-las condutoras através de vários processos físicos como evaporação ou a deposição de íons (*sputtering*), tais como íons de ouro. Nas pesquisas envolvendo materiais poliméricos, a preparação da amostra é o aspecto mais importante, uma vez que estaria relacionada diretamente com a qualidade das análises obtidas. Nesses casos o material nem sempre permite uma boa cobertura de íons, é necessário o recobrimento a partir da evaporação, no qual normalmente é utilizado o carbono, uma vez que são átomos maiores; ou ainda, quando não é desejada a incorporação de átomos na superfície (DEDAVID; GOMES; MACHADO, 2007).

3. ÁREA DE ESTUDO

3.1. Localização

A área em estudo situa-se no município de Patrocínio, na região do Triângulo Mineiro, no lado oeste de Minas Gerais numa mineração de fosfato. A área está aproximadamente a 410 km da capital do estado, que é Belo Horizonte, tendo o acesso pela rodovia BR-262 e adiante pelas rodovias estaduais MG-187 e MG-230, como mostra a Figura 11:

Figura 11-Mapa de localização da área em estudo



Fonte: Autoria Própria

3.2. Caracterização climática

Segundo Silva e Malvino, (2005), o município de Patrocínio está localizado no Estado de Minas Gerais, na região do Alto Paranaíba, na intersecção das coordenadas geográficas de 18°55’ de latitude sul e 46°58’ de longitude oeste de Greenwich, no domínio dos Planaltos e Chapadas da Bacia Sedimentar do Paraná, na porção sudoeste do Cerrado brasileiro, a uma altitude média de 960 m, ocupando uma área de 2.838 km².

O município de Patrocínio apresenta temperatura média de 21.4°C, com médias máximas chegando a 29°C e as menores médias são observadas nos meses de junho (12.4°C) e julho (12.2°C).

O clima da região do Alto Paranaíba no qual o município de Patrocínio está inserido, é do tipo Aw, possuindo um inverno seco e um verão chuvoso, dominado predominantemente pelos sistemas intertropicais e polares. O município é atingido por massas de ar oriundas do sul como a Frente Polar Antártica (FPA) e a Massa Polar (MP), leste (ondas de leste) e oeste (instabilidade tropical). Também sofre a influência das Zonas de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), que são responsáveis pelas chuvas intensas e prolongadas. A FPA influencia a ZCAS canalizando a umidade da Amazônia para a Região Sudeste.

As precipitações também variaram significativamente, os maiores valores registrados estão relacionados como a atuação do El Niño, bem com os menores. Os valores mensais apresentaram grandes valores como o registrado em 1980. Com exceção do ano de 1991 os últimos vinte anos a precipitação ficou abaixo da média.

3.2.1. Pluviometria – Distribuição de chuvas

Na área de estudo a precipitação é monitorada desde novembro de 1944 e possui dados até outubro de 2020. Os dados disponibilizados referentes ao período de 1974 a 2018 correspondem ao histórico de valores mensais de precipitação registrados pela estação Salitre (Código 1946005) da Agência Nacional de Águas (ANA), instalado a cerca de 8 km da mineração (Tabela 5).

A média plurianual foi de 1484,2 mm/ano. A média para o período chuvoso foi de 1281,5 mm/ano, correspondente a cerca de 86,3% da média anual. Já a média do período seco foi de 202,7 mm/ano.

O ano com a máxima precipitação foi em 1956/1957, atingindo um valor de 3129,6 mm, e o ano mais seco foi em 1968/1969, registrando uma pluviometria anual de 503,5 mm. Ressalta-se que os anos hidrológicos incompletos não foram considerados para a obtenção desses valores.

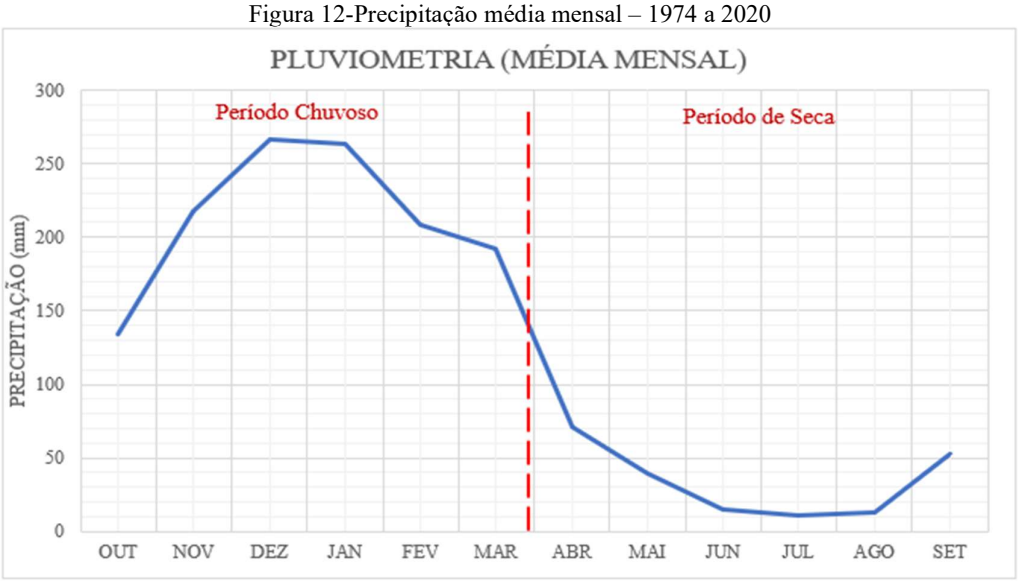
Tabela 5-Dados pluviométricos 1974 a 2018 sumarizados

Estação Salitre (Código 1946005)	PLUVIOMETRIA MENSAL TOTAL (mm)												TOTAL ANUAL (mm)
	PERÍODO CHUVOSO (mm)						PERÍODO SECO (mm)						
	OUT	NOV	DEZ	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	
MÉDIA	133.7	217.2	266	263	208.2	191.7	71.2	39.5	15	10.7	12.8	52.8	1484.2
MÍNIMO	0	0	0	51.5	39.3	40	0	0	0	0	0	0	503.5
MÁXIMO	802.4	615.5	714.6	549	683	435	194.4	156.5	208	74.4	105.3	189.6	3129.6

Fonte: Estação 1946005 - ANA

Na Figura 12 é apresentado o resumo da pluviometria média mensal onde é possível identificar que os meses de dezembro a janeiro são os mais chuvosos, com médias entre 263 a 266 mm. Já nos períodos de junho a agosto é possível observar meses mais secos, registrando médias que variam de 10 a 15 mm.

Figura 12-Precipitação média mensal – 1974 a 2020



Fonte: Estação 1946005 – ANA

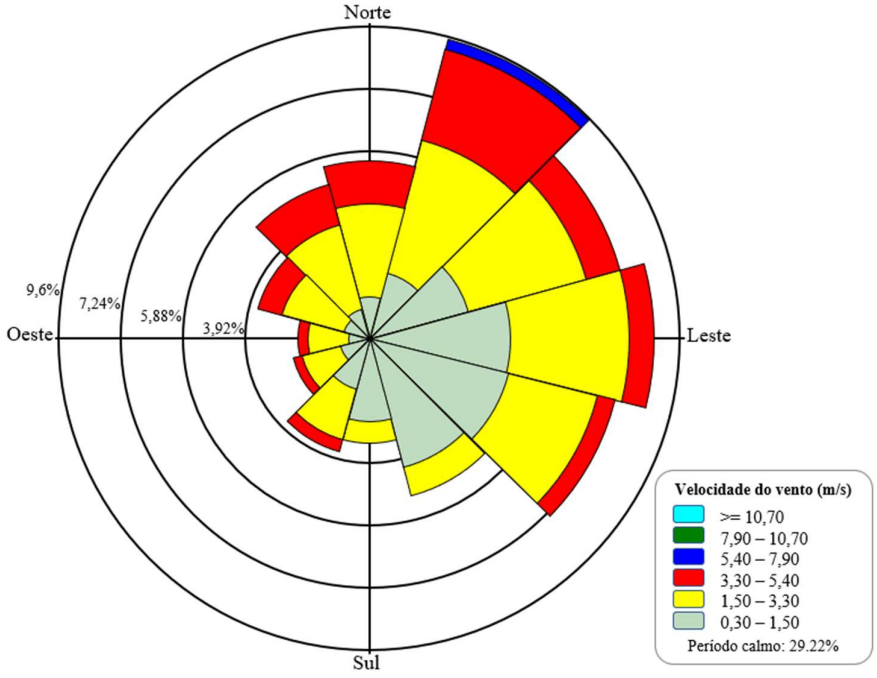
3.2.2. Direção dos ventos

O estudo de direção e predominância dos ventos foi realizado com base nos dados registrados entre os meses de fevereiro de 2017 e janeiro de 2022 na estação meteorológica A523 do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET instalada no município de Patrocínio, nas coordenadas (PROMINER, 2021).

- UTM: Fuso 23 K
- Latitude: 7.898.355 m N
- Longitude: 290.937 m E

Os dados meteorológicos foram processados pela empresa de consultoria, utilizando o software AERMET versão 21112 para alimentação do modelo AERMOD através da interface gráfica Lakes AERMET View versão 10.0.1. Por meio do aplicativo WRPLOT View – Wind Rose PLOT da Lakes Environmental Software Versão 10.0.1, permitindo a elaboração de rosa dos ventos para os anos de 2017 a 2021 para possibilitar a visualização das direções predominantes dos ventos na área em estudo, conforme apresenta a Figura 13, indicando a direção de onde os ventos vêm. Observa-se uma maior frequência dos ventos de nor-nordeste a su-sudoeste e de leste a oeste.

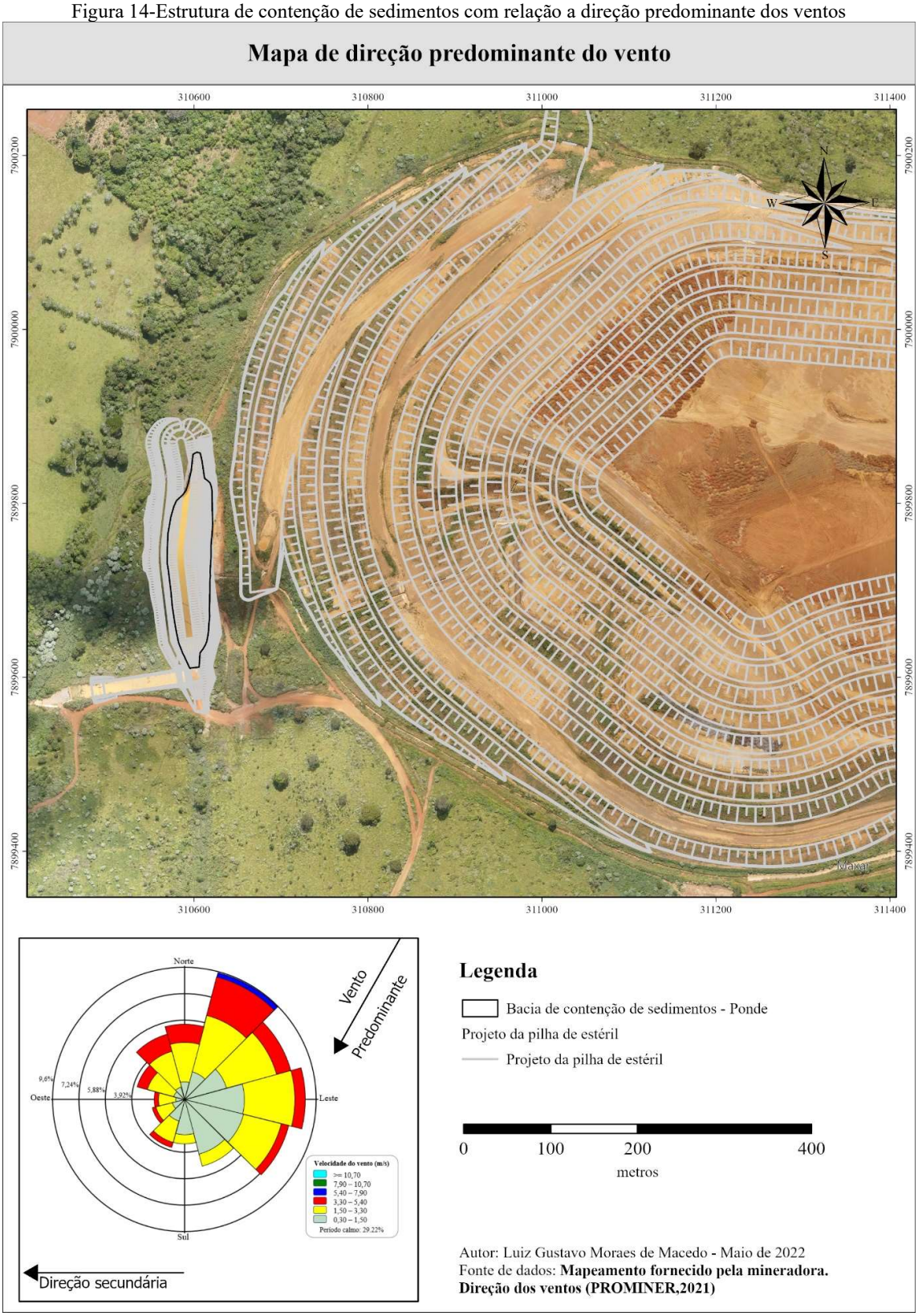
Figura 13-Direção predominante dos ventos



Fonte: PROMINER (2021)

Ao considerar que a área em estudo está inserida na regionalização da estação meteorológica A523, é possível transportar a rosa dos ventos gerada para a área em estudo e correlacionar a direção predominante dos ventos regionais com o fluxo superficial atuante na estrutura (Figura 14).

Figura 14-Estrutura de contenção de sedimentos com relação a direção predominante dos ventos



Fonte: Autoria Própria

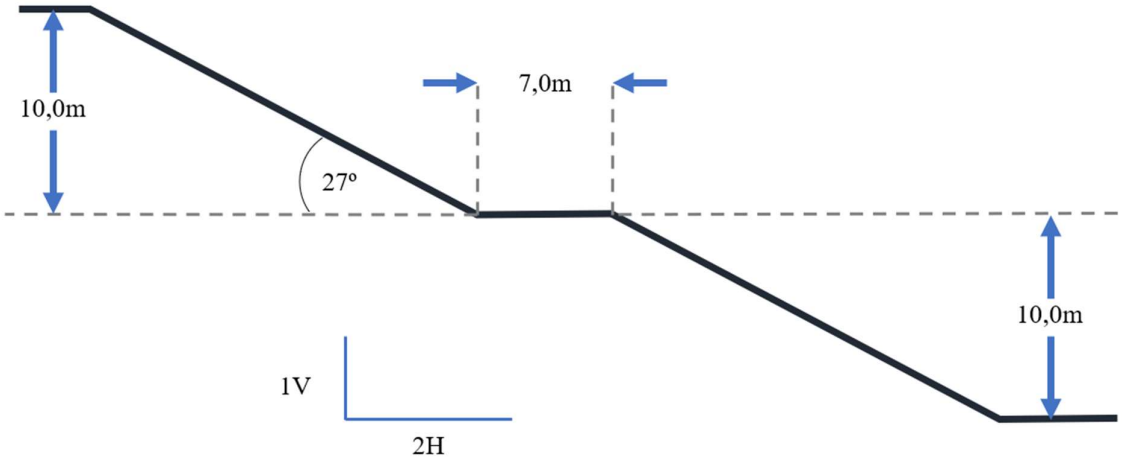
3.3. Pilha de estéril

A pilha de estéril alvo do presente estudo foi projetada para atender 07 anos de operação, utilizando como base o plano de lavra da mina, acomodando volume aproximado de 35,5 Mm³ (VOGBR, 2016a).

3.3.1. Arranjo geral do depósito

A geometria adotada é constituída por bancos de 10 m de altura, bermas de 7 m de largura e inclinação de face dos taludes de 1,0V:2,0H (27º), conforme detalhe típico apresentado na Figura 15

Figura 15-Detalhe Típico da geometria da pilha.



Fonte: Relatórios de projetos executivos da pilha de estéril (VOGBR, 2016a)

As características gerais da pilha são expostas na tabela a seguir:

Tabela 6-Principais características da pilha de estéril

Características da Pilha	
Volume Aproximado (Mm³)	35,5
Área Ocupada (ha)	9,34
Elevação Máxima (m)	1160
Altura Máxima (m)	137
Ângulo Geral	21º

Fonte: VOGBR, (2016a)

Os acessos de operação da pilha apresentam largura mínima de 30 m, enquanto os de manutenção apresentam mínimo de 10 m.

As bermas apresentam declividade transversal de 3%, e declividade longitudinal de 0,5%. Sendo construídas de maneira a se evitar a concentração do fluxo em pontos específicos da pilha e distribuindo ao máximo o escoamento ao longo da plataforma.

A pilha em questão não necessita de drenagem interna, pois não há um talvegue natural com drenagem e a vazão de água de chuva que percola pela pilha é considerada desprezível, não havendo a necessidade de dispositivo de drenagem interna.

3.3.2. Estudos hidrológicos e hidráulicos

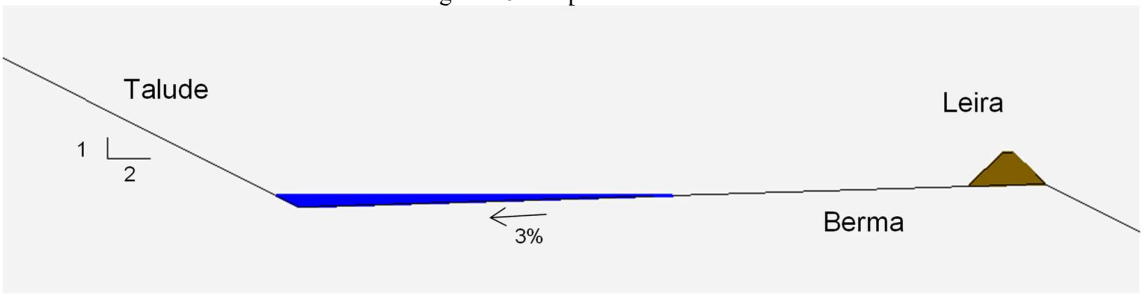
Para a pilha de disposição de estéril, foram dimensionadas estruturas a fim de ordenar a drenagem superficial, com objetivo de coletar as águas provenientes do escoamento superficial na pilha e conduzi-las, de forma ordenada, até os pontos de descarga no terreno natural, evitando carreamento de sólidos e o desenvolvimento de processos erosivos (VOGBR, 2016a).

O sistema de drenagem proposto é composto basicamente pelas seguintes estruturas:

- **Descidas d'águas** cuja função hidráulica é de coletar as vazões provenientes das bermas e conduzi-las de forma ordenada e dissipando energia até os canais periféricos;
- **Canais periféricos** de coleta e condução, tendo como objetivo coletar o escoamento proveniente das bermas, e áreas adjacentes, descartando-os juntos ao ponde a jusante da pilha.

Além disso, os bancos funcionam como canais (Figura 16) e a própria declividade longitudinal propicia o escoamento em direção às descidas d'águas propostas. Uma vez que são dotados de leira de proteção nos bancos, que protege o banco contra extravasamentos e percolação para os bancos subsequentes, auxiliando no processo de condução da água.

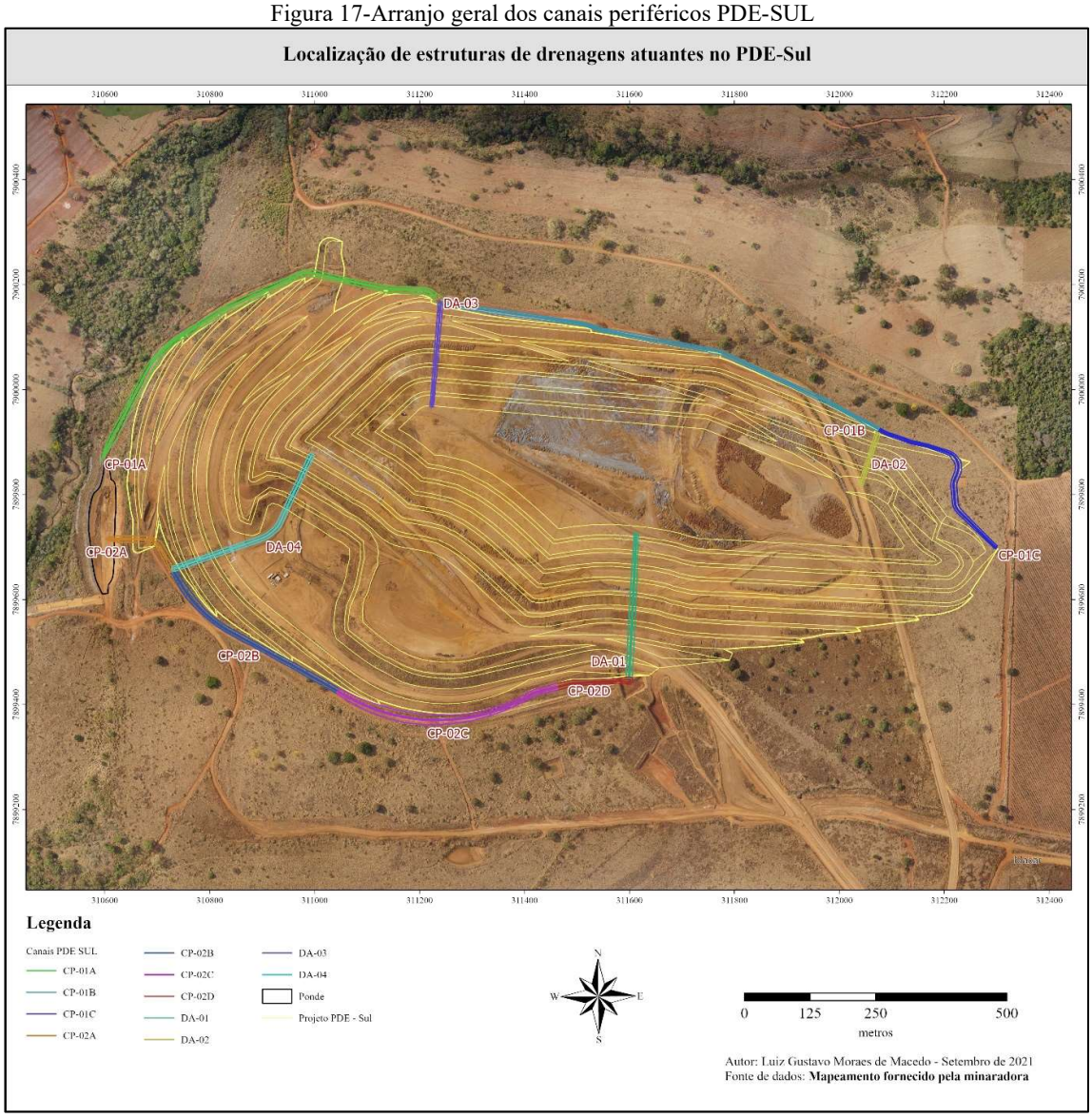
Figura 16-Croqui Berma/Pilha



Fonte: Relatórios de projetos executivos da pilha de estéril

A localização espacial dos canais periféricos (CP-01A, CP-01B, CP-01C, CP-02A, e CP-02B), bem como das descidas de água (DA-01, DA-02, DA-03 e DA-04) podem ser visualizados no mapa da Figura 17-Arranjo geral dos canais periféricos PDE-SU.

Figura 17-Arranjo geral dos canais periféricos PDE-SUL



Fonte: Autoria Própria

As estruturas de drenagem foram dimensionadas, considerando as premissas de tempos mínimos de recorrência dos eventos pluviométricos. Dessa forma, foi adotado um tempo de recorrência de 500 anos para os canais periféricos e descidas de água, conforme a NBR-13029:06, posteriormente revisada em 2017 (ABNT NBR 13029, 2017):

As características físicas utilizadas no dimensionamento englobam a determinação da área de drenagem, declividade média do terreno, comprimento do talvegue principal e do tempo de concentração.

As áreas de contribuição e os valores de declividade equivalente e tempo de concentração foram obtidos a partir da base topográfica atualizada disponibilizada pela mineradora (Tabela 7).

Tabela 7-Características Físicas das Área de Contribuição das Estruturas de Drenagem Superficial – Descidas e Canais Periféricos

Estrutura	Comprimento do Talvegue (m)	Tempo de Concentração Considerado (min)	Área de Drenagem (km²)
CP-01A	1086	10	0,069
CP-01B	880	15	0,156
CP-01C	914	20	0,395
CP-02A	880	10	0,293
CP-02B	965	15	0,596
DA-01	880	10	0,293
DA-02	540	10	0,125
DA-03	980	15	0,156
DA-04	580	5	0,274

Fonte: modificado de VOGBR, (2016a)

Para cálculo do tempo de concentração, adotou-se o método cinemático, considerando os valores de velocidade média para as bermas de 1,0 m/s, descidas d'água 6,0 m/s e canais periféricos de 5,0 m/s.

Foi adotado o Método Racional para a transformação dos eventos chuvosos em vazões, em virtude da magnitude das áreas de drenagem envolvidas (Área Drenada < 2,5 km²).

Este método preconiza que os eventos chuvosos correspondentes às vazões máximas têm a duração igual ao tempo de concentração da bacia de contribuição de cada estrutura, pela aplicação de um coeficiente de escoamento superficial definido em função da cobertura da bacia de contribuição, ou seja:

$$Q = 0{,}278.C.I.A \qquad \text{Equação [8]}$$

Onde:

- Q é a vazão de projeto (m³/s)
- C é o coeficiente de escoamento superficial
- I é a intensidade do evento chuvoso (mm/h)
- A é a área de drenagem (km²).

O coeficiente de escoamento superficial admitido para o cálculo das vazões de dimensionamento das estruturas propostas foi de 0,55 para área de pilha. Na Tabela 8 está apresentada a síntese dos cálculos para a obtenção das vazões de projeto para as diversas estruturas projetadas.

Tabela 8-Síntese dos cálculos de vazões de projeto

Estrutura	Tempo de Concentração (min.)	Período de Retorno TR (Anos)	Intensidade I (mm/h)	Área de Drenagem (Km²)	Coeficiente de Escoamento C	Vazão (m³/s)
CP-01A	10	500	371	0,069	0,55	3,94
CP-01B	15	500	331	0,156	0,55	7,90
CP-01C	20	500	298	0,395	0,55	18,01
CP-02A	10	500	371	0,293	0,55	16,62
CP-02B	15	500	371	0,596	0,55	30,12
DA-01	10	500	371	0,293	0,55	16,62
DA-02	10	500	371	0,125	0,55	7,08
DA-03	15	500	331	0,156	0,55	7,90
DA-04	5	500	421	0,274	0,55	17,66

Nota: CP – Canal periférico; DA – Descida de água
Fonte: Modificado de VOGBR (2016a)

Dimensionamento hidráulico dos dispositivos de drenagem superficial

O dimensionamento hidráulico das estruturas do sistema de drenagem superficial foi realizado considerando os trechos com declividade máxima e mínima apresentados pelas estruturas, para determinação da velocidade e altura máximas da lâmina de água, respectivamente (VOGBR, 2016a).

Nos trechos em que as estruturas apresentaram perfil longitudinal em degraus, utilizou-se a metodologia do SkimmingFlow, com o auxílio do software SisccoH, desenvolvido pelo Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

Nos trechos sem degraus, foi utilizada a metodologia proposta por Manning:

$$Q = \frac{1}{n} x A x R h^{\frac{2}{3}} \sqrt{I} \qquad \text{Equação [9]}$$

Onde:

- Q é a vazão (m³/s)
- n é o coeficiente de rugosidade de Manning, (n=0,015, revestimento em concreto)
- A é área molhada (m²)

- *Rh* é o raio hidráulico da seção molhada (m)
- *I* é a declividade longitudinal (m/m).

Canais e descidas

No dimensionamento hidráulico dos canais e descidas foram adotadas a metodologia de Manning para os trechos em fundo liso (sem degraus), admitindo o escoamento permanente e uniforme(VOGBR, 2016a).

Para tanto foram utilizadas as vazões de projeto advindas dos eventos de cheia cujo tempo de retorno é igual a 500 anos.

A Tabela 9 e Tabela 10 apresentam as sínteses dos dimensionamentos dos canais e descidas para a situação mais crítica (menor e maior declividades) nos trechos sem e com degraus.

Tabela 9-Síntese do Dimensionamento Hidráulico dos Canais Periféricos e Descidas – Trecho sem degraus.

Trecho	Q (m^3/s)	Altura Parede (m)	Base (m)	Declividade (%)	Coef. de Manning	Prof (m)	Borda Livre (m)	Velocidade (m/s)
CP-01A	3,94	1,0	1,5	1,0	0,015	0,76	0,24	3,48
				5,0	0,015	0,42	0,58	6,23
CP-01B	7,90	1,0	1,50	2,2	0,015	0,95	0,05	5,54
				6,0	0,015	0,65	0,35	8,09
CP-01C	7,90	2,0	2,0	1,0	0,015	1,81	0,19	4,97
CP-02A	16,62	1,5	1,5	1,0	0,015	1,18	0,32	9,38
				6,0	0,015	0,85	0,65	9,74
CP-02B	30,12	2,0	3,0	1,0	0,015	1,74	0,26	5,77
				4,2	0,015	1,02	0,98	9,81
DA-01	16,62	2,0	2,0	1,0	0,015	1,70	0,30	4,90
DA-02	7,08	1,5	1,5	1,0	0,015	1,19	0,31	3,97
DA-03	7,90	1,5	1,5	1,0	0,015	1,30	0,20	4,06
DA-04	17,66	2,0	2,0	1,0	0,015	1,78	0,22	4,95

Nota: CP – Canal periférico; DA – Descida de água
Fonte: Modificado de VOGBR (2016a)

Tabela 10-Síntese do Dimensionamento Hidráulico dos Canais Periféricos e Descidas – Trecho com degraus.

Trecho	Q (m^3/s)	Altura Parede (m)	Base (m)	Altura Degrau (m)	Declividade (%)	Profundidade (m)	Velocidade (m/s)
CP-01B	7,90	2,0	2,0	0,50	10,63	0,35	3,24
CP-01C	18,01	2,0	2,0	0,50	9,52	1,29	6,97
					50,0	1,32	6,82
CP-02B	30,12	2,0	3,0	0,5	13,89	1,68	5,95
					50,0	1,62	6,21
DA-01	16,62	1,5	1,5	1,0	50,0	1,34	6,19
DA-02	7,08	1,5	1,5	1,0	50,0	0,86	5,51
DA-03	7,90	1,5	1,5	1,0	50,0	0,94	5,63
DA-04	17,66	2,0	2,0	1,0	50,0	1,41	6,28

Nota: CP – Canal periférico; DA – Descida de água
Fonte: Modificado de VOGBR (2016a)

3.4. Bacia de contenção de sedimentos (ponde)

Durante o período de construção e operação da pilha de estéril, eventuais sólidos podem ser carreados ao longo dos eventos chuvosos e são retidos por uma estrutura de contenção de sedimentos, denominado de *ponde*.

O reservatório do ponde foi dimensionado para atender o volume de sedimentos provenientes da área de contribuição onde está inserida a pilha de estéril Sul e para atender o volume de água de detenção (VD), destinado a fornecer o tempo necessário à sedimentação das partículas no interior do reservatório.

O funcionamento da estrutura se baseia no processo de sedimentação, ou seja, separação, pela ação da gravidade do material em suspensão, em função da vazão afluente e velocidade de sedimentação da partícula.

A taxa de produção média de sedimentos considerada pelo projetista foi igual a 300 m^3/ha x ano para área da superfície da pilha e 10 m^3/ha x ano para os sedimentos provenientes do terreno natural (VOGBR, 2016b).

Na Tabela 11 é apresentada a síntese do dimensionamento do ponde, tendo em vista o controle de sedimentos.

Tabela 11-Dimensionamento do reservatório do Ponde de Contenção de Sedimentos

Estrutura	Área de Contribuição (Km^2)	Coeficiente de Escoamento		Taxa de Sedimentação (m^3/ha x ano)		Cota de Sedimentos (m)	Volume Sedimentos (m^3)	Tempo de operação antes da 1ª limpeza (meses)
		Pilha	Terreno Natural	Pilha	Terreno Natural			
Pond	1,08	0,40	0,30	300	100	1.013,50	14.096	6

Fonte: VOGBR, (2016b)

Para que um reservatório possa reter toda a faixa granulométrica das contribuições de descargas sólidas, foi realizado o cruzamento das velocidades médias dos escoamentos com o diâmetro das partículas transportadas. Na Tabela 12 os diâmetros médios das partículas utilizados no estudo são apresentados.

Tabela 12-Classificação dos Sedimentos Quanto á Granulometria.

Classificação Faixa Granulométrica	**Diâmetro da partícula (mm)**	**Velocidade De Queda Da Partícula (m/s)**
Areia Média	2,000	**3,43E+00**
Areia Fina	0,425	**1,55E-01**
Silte Fino	0,075	**4,82E-03**
Argila	**0,002**	**3,43E-06**

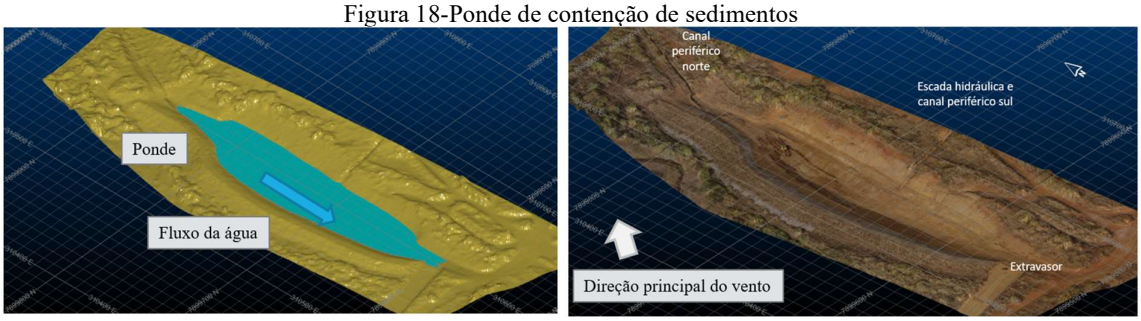
Fonte: VOGBR, (2016b)

Para promover o tempo de detenção ou residência dos sedimentos, definido como o quociente entre o volume total do reservatório e a vazão em trânsito, estima-se a vazão dominante como critério de cálculo do volume a ser locado. Salienta-se que o volume útil para decantação é da ordem de 3.830 m³ (correspondente a 0,50 m de lâmina de água).

Segundo a VOGBR (2016b), ao utilizar os parâmetros apresentados, constata-se que o ponde apresenta uma eficiência média de retenção igual a 90%, retendo partículas de areia média, areia fina e silte.

O ponde foi confeccionado em estrutura alongada norte-sul, com dimensões aproximadas de 250m x 50m x 9m (CxLxP), com volume útil de sedimentação de 68.960m³ e cota de vertimento em 1014.35m (Figura 18).

Figura 18-Ponde de contenção de sedimentos



Fonte: Autoria Própria

3.5. Restrições da pesquisa

Por se tratar de uma pesquisa exploratória aplicada o presente estudo partiu de um problema real, visando a sua mitigação completa ou parcial através de experimentos em obra real.

Em fevereiro de 2020 eventos climáticos atuantes na pilha de estéril culminaram em um estresse excessivo sobre o sistema de drenagem e da estrutura de contenção de sedimentos do depósito, denominado de ponde. Em decorrência desse estresse, uma grande quantidade de efluentes com elevada turbidez foi lançado no córrego a jusante da estrutura.

Visando reduzir tal risco, a mineradora adquiriu no mercado, em novembro de 2020, cortinas de turbidez com 3m de profundidade e 60m de comprimento total, divididos em 4 seções, sendo duas com 20m e duas com 10m. Após análise no local identificou a impossibilidade de instalação das cortinas no período de chuvas 2020/2021, por falta de acesso ao interior do ponde que se encontrava cheio no referido período.

A postergação da instalação da estrutura para o período de chuvas 2021/2022, permitiu o início da pesquisa atual, de tal forma a permitir avaliar de forma sistemática a efetividade e dificuldades associadas as estruturas denominadas de cortinas de turbidez.

Já no início da pesquisa, foram identificados alguns riscos referentes à segurança do sistema. Não por menos, a maioria dos cenários de risco giram em torno de chuvas intensas e pontuais capazes de sobrecarregar o sistema de drenagem do depósito e elevar rapidamente o nível do ponde, impondo as cortinas um regime hídrico de alta energia.

Dessa forma, em parceria com a equipe de segurança da mineradora, foram elencados 04 cenários críticos que deveriam ser evitados, envolvendo picos de vazão:

- Rompimento do cabo de ancoragem
- Elevação da carga hidráulica a montante da cortina
- Rompimento e/ou estouro das cortinas
- Erosão das margens do ponde

Tendo em vista os riscos associados aos cenários mais críticos, exigiu um dimensionamento e ações para tal. No entanto, o sistema não verte constantemente, sendo dependente diretamente das chuvas. Operacionalmente, devido a diversas restrições relacionadas ao projeto do ponde ou visando a integridade física da equipe envolvida,

impediram a correta manutenção e adequação do sistema para os cenários a que o sistema foi exposto.

3.5.1. Picos de vazão e turbidez

Como as primeiras chuvas, geralmente entre os meses de setembro e outubro, apresentam um elevado risco de formação de fluxo de detritos, e consequentemente aterrar as cortinas previamente instaladas, nesse aspecto o recomendado seria aguardar o enchimento do ponde e realizar a instalação por embarcação, ou equipamentos móveis, tais como escavadeiras nas margens da estrutura. No entanto, a falta de acesso às margens do ponde, concomitante com a restrição de segurança da mineradora, referente a entrada de embarcações no interior do ponde, impediram a adoção de tal método de instalação.

O baixo entendimento do comportamento hidráulico do fluido após a instalação das cortinas, bem como a resposta das cortinas ao regime hídrico imposto resultou inicialmente na adoção de uma geometria de instalação de baixa efetividade. Ao consultar a empresa fornecedora das cortinas, esta não garantiu ou recomendou a configuração em "U", mesmo sendo citada por diversos autores como a mais efetiva, uma vez que o risco de rompimento da cortina diante dos picos de vazão seria alto.

Dessa forma, as cortinas foram estendidas ao longo do cabo de ancoragem superior no dia 23 de outubro de 2021. Na ocasião, verificou-se que as cordas de amarração estavam com comprimento variável e a necessidade de reforçar os elementos de ancoragem, sendo necessária a utilização de uma PTA – Plataforma de trabalho em altura, indisponível na ocasião.

No dia 26 de outubro de 2021 ocorreu a maior chuva do período 2021-2022, com 117,6mm enchendo o ponde e impedindo qualquer adequação ao sistema. Ao avaliar a Figura 19, podemos identificar em (a) as variações das cordas de amarração, responsáveis pelo controle de alongamento do eixo central da cortina. Já na imagem (b) é possível ter uma noção do volume de aporte na estrutura em menos de 18 horas, tempo entre as imagens, bem como a força, capaz de carrear entulhos através do sistema de drenagem e que posteriormente passaram pela cortina.

Em função da restrição de acesso, não foi possível diagnosticar eventuais danos as cortinas, sendo dado prosseguimento a pesquisa, considerando que não houve tais danos[1].

Figura 19-Imagens comparativas do ponde antes (a) e depois (b) da chuva ocorrida no dia 26/10/2021.



(a) 25 de outubro de 2021 – 15:59 (b) 26 de outubro de 2021 – 09:53

Fonte: Acervo pessoal

Nessa mesma ocasião foi verificado um fenômeno, não contemplado na fase de projeto. Como não existem acessos em outros locais da estrutura, toda o acesso, seja para limpeza, manutenção ou inspeção ocorre pelo extravasor da estrutura em estrada de acesso de sul para norte. Esse acesso, cria uma rampa de acesso com 10% de inclinação, nivelando com o extravasor da estrutura. Ou seja, toda a água que chega ao ponde, para extravasar sofre uma redução da seção de escoamento.

Seguindo o princípio de Bernoulli, uma vez que não há alteração da densidade de entrada e saída do fluido, temos uma aceleração desse fluido e consequentemente uma maior energia de carreamento de partículas, que associado aos finos disponíveis no acesso, sejam gerados pelas máquinas ou sedimentados, culminam no revolvimento desses sedimentos e consequentemente num aumento da turbidez de saída da estrutura.

Para reduzir os efeitos do revolvimento dos sedimentos finos no efluente extravasado, foi sugerida a construção de uma silt fence na saída do ponde, utilizando um geotêxtil de gramatura elevada. Ao considerar a distribuição granulométrica, similar ao da amostra AG-PDE-01 seria necessária a adoção de uma geotêxtil com abertura de filtração de 19µm, não disponível em catálogo no mercado, sendo necessário o desenvolvimento de um geotêxtil para atender tal

[1] Até o presente momento, o ponde encontra-se com o reservatório cheio, impedindo a exumação da cortina para avaliação de potenciais danos a saia da cortina.

demanda. Para atender à solicitação e elevar a resistência do sistema optou-se por utilizar alambrado metálico para auxiliar o sistema e manter o geotêxtil no local.

No dia 28 de dezembro de 2021, adotou-se o geotêxtil não tecido GF 26/500 com O_{95} de 70 µm, cedido pela Ober, sabendo que parte do particulado iria transpassar o geotêxtil. No entanto, já no primeiro evento de elevação do nível da água (03/01/22) o volume de sedimento mobilizado da rampa de acesso, associado a sólidos objetáveis, tais como galhos e folhas provenientes do sistema de drenagem rapidamente colmataram o geotêxtil.

Na Figura 20 é possível identificar que as chuvas intensas no final de dezembro e início de janeiro, chegando ao pico de 76,6mm/dia no dia 31/12, rapidamente elevaram o nível da água sobre a silt fence, chegando a galgar o geotêxtil (Figura 20 a). A estrutura suportou o aporte de água, sem ruptura ou rasgo do geotêxtil, mas não permitiu dar vazão ao volume de entrada. Após o início do recuo da linha d'água, a colmatação ficou clara (Figura 20 b). No final de janeiro, após um breve período de estiagem é possível identificar a formação de uma torta de material acumulado a montante do geotêxtil (Figura 20 c).

No dia 09 de fevereiro de 2022, uma nova chuva intensa, de 73,40mm, o aporte de água e sólidos objetáveis na cortina de controle de sedimentos superou a resistência dos postes de sustentação, vindo a quebrar dois postes centrais (Figura 21). Na imagem é possível identificar que sólidos objetáveis, principalmente galhos e folhas se acumularam na estrutura acima da linha do geotêxtil, sobrecarregando os postes de sustentação e ocasionando a falha da estrutura. Com o objetivo de evitar o desprendimento da cortina e deslocamento do material para o córrego receptor, optou-se por retirar a estrutura no dia 10 de fevereiro de 2022.

Figura 20-Imagens comparativas dos efeitos das chuvas na cortina de controle de sedimentos



(a) 03 de janeiro de 2022 (b) 10 de janeiro de 2022 (c) 28 de janeiro de 2022

(a) Galgamento do geotêxtil após as chuvas; (b) Colmatação aparente após recuo do nível da água; (c) Material formando uma torta na porção a montante da cortina de controle de sedimentos
Fonte: Acervo pessoal
Figura 21-Falha na cortina de controle de sedimentos (*silt fence*).



Fonte: Acervo pessoal

No período de chuvas subsequente (2022-2023), não foram registrados picos de vazão tão intensas quanto no período 2021-2022. Sendo assim, as cortinas, mesmo adotando uma geometria de maior risco (em "U", restringindo o fluxo) não apresentou danos ao longo da segunda parte da pesquisa.

A cortina foi reinstalada em 21 de setembro de 2022, sendo que a estrutura somente verteu no dia 20 de dezembro de 2022, apenas 90 dias após a instalação da cortina, ao contrário do ano anterior, no qual a estrutura verteu em cerca de 60 horas após a instalação.

3.5.2. Restrições operacionais e de segurança

As restrições de acesso e mobilidade da cortina afetaram, mesmo que indiretamente, o desenvolvimento do experimento, uma vez que impediram a adequação das cortinas a cada regime hídrico, manutenções e corretas inspeções das cortinas.

O modo como o ponde foi projetado, impede o acesso de equipamentos móveis a estrutura, por qualquer de suas margens, sendo o único acesso de equipamentos móveis pelo extravasor da estrutura. Dessa forma as operações de instalação, reposicionamento e manutenção das cortinas ficam impossibilitadas quando o ponde está cheio, sendo todas essas atividades restritas ao período de seca, quando a estrutura está vazia.

O único acesso nas proximidades das cortinas se dá exclusivamente caminhando pela margem oeste do ponde. A mineradora não dispões de embarcações que pudessem ser utilizadas para acesso ao interior do ponde, impedindo assim inspeções a saia da cortina até que esta estivesse completamente exposta no período de seca. Dessa forma, todas as análises e inspeções ficaram restritas a margem oeste, impedindo a realização de espacialização da pluma de turbidez que atingiu as cortinas. Dentre os riscos assinalados para a restrição de acesso estão:

- Queda em mesmo nível (piso escorregadio)
- Torção (na área com enrocamento)
- Afogamento (profundidade de até 9m no interior do ponde)
- Insolação
- Descargas elétricas (raios durante as chuvas)
- Animais peçonhentos (cobras e abelhas)

3.5.3. Direção do vento variável

Segundo Francingues e Palermo (2005) e Pilarczyk, (2000), os ventos atuam negativamente as cortinas de turbidez pois infligem nessas estruturas cargas hidráulicas de onda que podem romper os cabos de ancoragem e de tensão. No entanto, o efeito na turbidez do material em suspensão é pouco abordado.

No princípio da pesquisa aventou-se a possibilidade de os ventos gerarem ondas de até 5cm, e que em função disso dever-se-ia reforçar o cabo de tensão, como foi realizado. No entanto, não foi levantada a mudança de regime lótico para regime lêntico.

No ambiente lótico (rios e canais) apenas a direção principal (NNE-SSW) é requerida, pois a carga hidráulica atuante na cortina proveniente do fluxo (N-S) é somada a carga hidráulica das ondas provocada pelos ventos, uma vez que as direções são similares.

Após as regressões da linha d'água no ponde, durante os períodos de estiagem, o ponde deixa de verter para o curso hídrico próximo, alterando o regime de lótico para lêntico (lagos,

açudes e lagoas). Nesse ponto a direção dos ventos rege o movimento das ondas, que por sua vez direciona o fluxo hídrico no interior do ponde.

Uma vez instaurado o regime lêntico processos de convecção no fluido em decorrência do aquecimento pelo sol e o vento atuante passam a ser os principais agentes que orquestram o fluxo hídrico no interior do ponde. Conforme exposto no item 3.2.2 os ventos na área são variáveis apresentando como direção principal a direção NNE-SSW, seguido de E-W, mas não se restringindo a essas duas direções. Em decorrência dessa variação o fluxo hídrico, considerado inicialmente como unidirecional, passa a ser bidirecional.

Figura 22-Registro fotográfico de fluxo hídrico normal (sup.) e invertido (inf.).



Fonte: Acervo Pessoal

O fluxo bidirecional pode ser visualizado nas inspeções visuais realizadas. Na Figura 22 é possível identificar momentos em que o fluxo hídrico está no sentido “normal”, sendo sua direção similar a de projeto, quando a estrutura está vertendo. No entanto, foram identificados momentos em que o fluxo se apresenta “invertido”, destacado pelas ondas e fluxo próximo das cortinas e na margem oeste do ponde. O fluxo invertido, associado a geometria de instalação

em labirinto, permite a homogeneização da turbidez ao longo do ponde, reduzindo ainda mais a efetividade das cortinas.

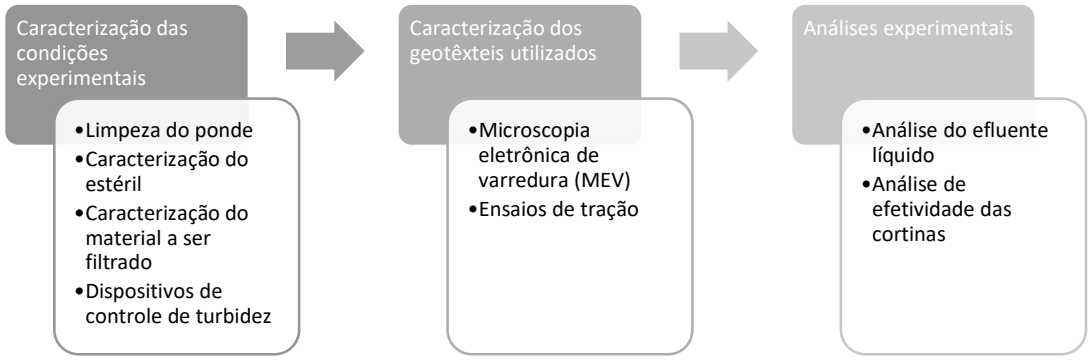
4. METODOLOGIA

Para realização do presente estudo, foram instaladas cortinas de turbidez e cortinas de controle de sedimentos, na estrutura de contenção de sedimentos, denominada de ponde, situada a jusante de uma pilha de estéril de uma mineração de rocha fosfática localizada no Alto Paranaíba, visando avaliar a efetividade do referido dispositivo na redução de turbidez do efluente pós-chuvas, proveniente do sistema de drenagem superficial.

O presente estudo adota o método hipotético-dedutivo no qual as hipóteses de que; as cortinas de turbidez, *silt curtains*, e as cortinas de controle de sedimentos, *silt fence*, podem ser aplicadas de forma eficaz na redução de turbidez quando instaladas num sistema de drenagem superficial de uma pilha de estéril, assim como resistirão a condições adversas de obra em local sujeito a picos de vazão. Tais hipóteses tentarão ser testadas com base nos experimentos aplicados em obra real.

A natureza do estudo é científica aplicada, no qual objetiva-se a redução real de turbidez do efluente gerado pelo sistema de drenagem da pilha de estéril. Para tanto, foi adotada uma abordagem quantitativa dos parâmetros de pluviosidade; turbidez do efluente, antes e depois das cortinas de turbidez; degradação do geotêxtil aplicado na obra, de tal forma a permitir a realização de um modelo de dados que valide ou refute as hipóteses levantadas.

Figura 23-Fluxograma macro da metodologia adotada.



Fonte: autoria própria

A estrutura metodológica adotada divide o estudo em três blocos metodológicos, sendo o primeiro composto por métodos de caracterização das condições experimentais, uma vez que a pesquisa experimental aplicada em campo não apresenta controle das condições ambientas, sendo necessário monitorar e caracterizar essas condições, antes da análise dos dados. O segundo bloco de metodologias é composto pela caracterização dos geotêxteis instalados nas estruturas. Por fim, o terceiro bloco de metodologia contempla a integralização dos dados para validar ou refutar a hipótese inicial levantada através das análises do efluente e efetividade das cortinas de turbidez (Figura 23).

4.1. Caracterização das condições experimentais

A pilha de estéril em questão possui uma área superficial de 93.5ha, em fase de operação, no qual o processo de revegetação dos taludes por hidrossemeadura está em fase inicial e recobre menos de 11.8% da área total da pilha. As drenagens superficiais direcionam a água coletada pelas bermas em canaletas, até escadas hidráulicas que por sua vez são direcionadas por dois canais periféricos até uma bacia de contenção de sedimentos denominada de ponde, que tem aproximadamente 230m de comprimento, em média 45m de largura e 9m de profundidade em seu ponto mais profundo e um vertedouro de 15m de largura. A estrutura recebe águas de drenagem superficial do depósito, sendo responsável por conter os sólidos maiores até verter para o córrego receptor.

Figura 24-Ponde em processo de limpeza



Fonte: Acervo pessoal – setembro de 2021

Ao término de cada período de seca, quando a estrutura do ponde encontra-se seca é realizada uma manutenção da estrutura, retirando o material sedimentado e preparando a estrutura para receber a carga de sedimentos do período de chuvas subsequente (Figura 24-Ponde em processo de limpeza).

4.1.1. Limpeza do ponde

Durante o período de estiagem, entre abril e setembro de cada ano, praticamente não há entrada de efluentes no ponde, fazendo com que a água presente na estrutura seque completamente, expondo o material sedimentado do último período de chuvas.

A limpeza da estrutura tem como objetivo manter o volume útil disponível para recepção de sedimentos. Dessa forma, todos os anos a estrutura é limpa no período de estiagem mantendo assim a capacidade de armazenamento do ponde.

Figura 25-Limpeza mecânica do material sedimentado no fundo do ponde.



Fonte: Acervo pessoal – setembro de 2021

Os sedimentos são retirados mecanicamente, por intermédio de retroescavadeiras (Figura 25) e transportado por caminhões basculantes até o topo da pilha de estéril, onde é nivelado, compactado e incorporado ao depósito.

Figura 26-Ponde após limpeza da estrutura, com detalhe para a criação de berma no canto inferior direito.



Fonte: Acervo pessoal – setembro de 2021

A limpeza do ponde permite a manutenção da geometria de projeto e até adequada em caso de alguma necessidade, como em 2020 quando uma berma de equilíbrio foi confeccionada para preservar a integridade do flanco leste do ponde após sua última expansão (Figura 26). No ano de 2021 foram retirados 11.887m³ de material sedimentado.

4.1.2. Caracterização do estéril

No Brasil o material estéril para a mineração é considerado um resíduo sólido que é normatizado pela ABNT NBR 10004 (2004), que classifica os resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, para que possam ser gerenciados adequadamente.

Para a ABNT NBR 10004 (2004), os resíduos sólidos são materiais resultantes de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição, incluindo lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.

A classificação de resíduos envolve desde a identificação do processo ou atividade geradora do resíduo, dos constituintes e características físico-químicas desses resíduos, comparadas com as listagens de resíduos e substâncias que apresentam impacto à saúde e ao meio ambiente conhecidos (Figura 27) (ABNT, 2004).

A ABNT NBR 10004 (2004), dividiu os resíduos em duas classes, para que sejam gerenciados corretamente:

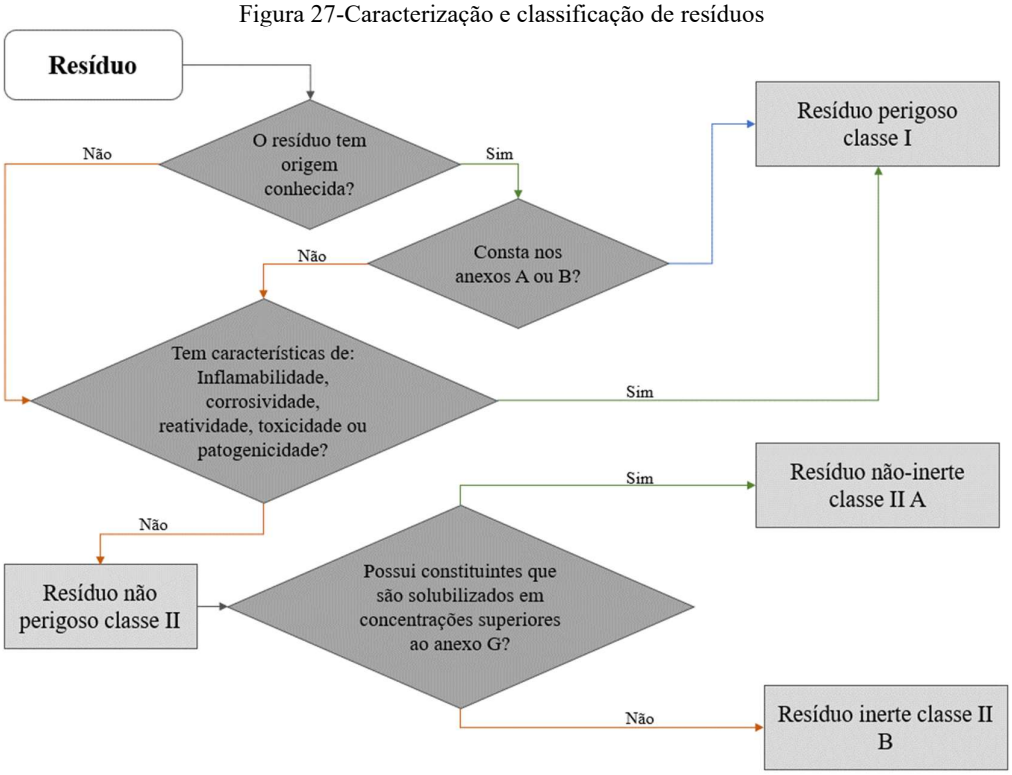
- Classe I de resíduos perigosos

Os resíduos perigosos fazem parte da classe I e são aqueles que apresentam riscos à saúde pública e ao meio ambiente, exigindo tratamento e disposição especiais. Também são classificados assim os resíduos que são inflamáveis, corrosivos, tóxicos, patogênicos, e possuem tendência a sofrer uma reação química

- Classe II de resíduos não perigosos
    - Inertes
    - Não-inertes

Os demais resíduos são classificados como classe II, não perigosos, podendo ser inertes, quando em contato com água, não sofrem transformações físicas, químicas ou biológicas, mantendo-se inalterados por um longo período. Ou resíduos não inertes que podem apresentar propriedades biodegradáveis, comburentes ou solúveis em água (ABNT NBR 10004, 2004).

Figura 27-Caracterização e classificação de resíduos



Fonte: modificado de NBR 10004:2004

Ao analisar a área em estudo, podemos identificar que a geologia local sofreu influência de enriquecimento supergênico, processo no qual as águas meteóricas, ligeiramente ácidas,

promovem a lixiviação *in situ* do material, gerando as zonas intempéricas mencionadas no capítulo de geologia local.

Dessa forma, as coberturas que compõem a camada de aloterito, mais próxima da superfície, não apresentam teores de P_2O_5 apatítico, associado ao mineral apatita, em concentrações economicamente exploráveis, pois tiveram a apatita lixiviada. Posteriormente, já na camada de isalterito ocorre a recristalização do P_2O_5 como fosfato secundário na zona vadosa do isalterito. O fosfato secundário, ao contrário da apatita, não possui rota de beneficiamento que permita o seu aproveitamento na produção de fertilizantes sendo, portanto, também classificado como estéril.

O estéril, portanto, é composto por um material que apresenta uma quantidade elevada de minerais resistatos, resistentes ao intemperismo, com características areno-argiloso avermelhado, por vezes com presença de canga, turfa ou material areno-argiloso maciço, gradando para níveis de granulação areno-argilosa e coloração alaranjada ou vermelha, intercalados com níveis de magnetititos, rochas compostas por mais de 90% de magnetita, alterados com granulometria média a grossa.

O material estéril é disposto no depósito mecanicamente, espalhado e compactado sem a adição de nenhum produto químico que altere as características físico-químicas do material.

Em abril de 2021 a empresa mineradora realizou amostragem composta na pilha de estéril, sendo a amostra classificada como Classe II B - Resíduo Inerte

4.1.3. Caracterização do material a ser filtrado

Para compor o presente estudo foram coletadas 12 amostras, distribuídas em dois grupos amostrais.

O primeiro grupo visando caracterizar o material depositado é composto por 6 amostras coletadas diretamente na pilha de estéril, representando o material depositado mecanicamente na pilha de estéril.

O segundo grupo, também composto por 6 amostras, visou caracterizar o material sedimentado em meio fluido no interior do ponde, sendo coletado em três pontos amostrais em dois períodos de chuvas consecutivos entre 2021 e 2023.

As amostras coletadas no interior da pilha de estéril servem para caracterizar o material erodível, ou seja, que pode ser carreado pelo sistema de drenagem e representam fonte potencial de sedimentos em diferentes momentos de deposição (Tabela 13).

Tabela 13-Amostras coletadas na pilha de estéril para análise granulométrica.

Amostra	Unidade geotécnica	Local
AG-PDE-04	Estéril compactado	Canal de drenagem escavado
AG-PDE-05	Estéril tombado	Praça de deposição, sem espalhamento ou compactação
PDE-122	Estéril compactado	Amostras históricas localizadas no topo do depósito e coletadas à 1m de profundidade para avaliação a evolução de compactação do estéril.
PDE-123B		
PDE-124A		
SPDE-121		

Fonte: autoria própria

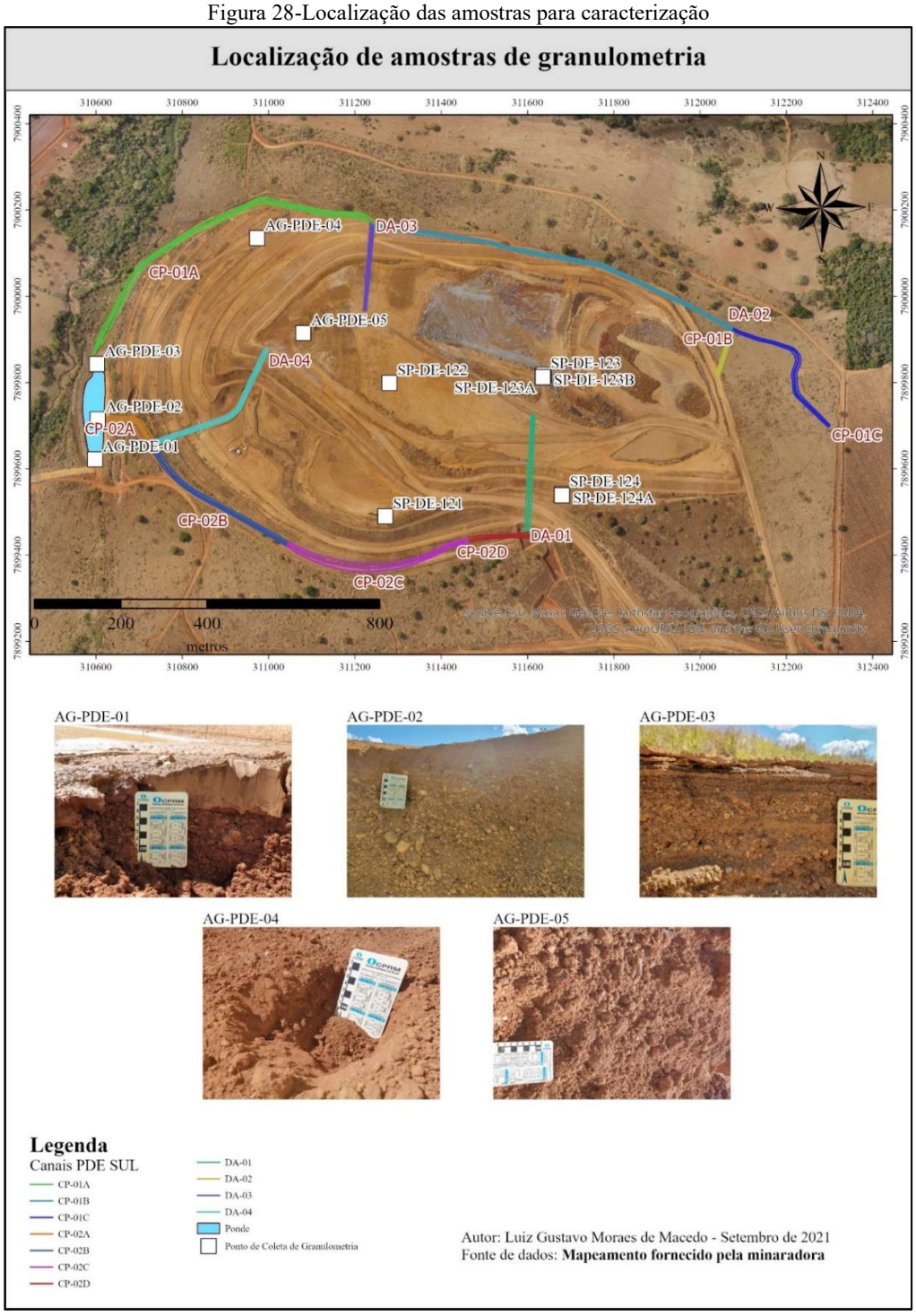
Para analisar o material que efetivamente é carreado pelo sistema de drenagem foram coletadas 03 amostras no interior da estrutura de contenção de sedimentos em julho de 2021, com uma duplicata no ano subsequente, em julho de 2022, ambas no auge da seca, totalizando 06 amostras no interior do ponde (Tabela 14).

Tabela 14-Amostras coletadas na pilha de estéril para análise granulométrica.

Amostra	Unidade geotécnica	Local	Ano da coleta
AG-PDE-01-21	Material sedimentado	No final da estrutura de contenção, próximo ao vertedouro	2021
AG-PDE-01-22			2022
AG-PDE-02-21		Início da estrutura de contenção no emboque do canal periférico norte	2021
AG-PDE-02-22			2022
AG-PDE-03-21		Porção intermediária da estrutura de contenção no emboque do canal periférico sul	2021
AG-PDE-03-22			2022

Fonte: autoria própria

Figura 28-Localização das amostras para caracterização



Fonte: Autoria Própria

As amostras de solo coletadas (Figura 28) foram divididas em 2 grupos, o primeiro grupo é alusivo a área fonte, as quais foram coletadas diretamente da pilha de estéril em duas condições distintas. A primeira amostra foi coletada em condição compacta, por se tratar de um trecho da rampa de acesso oeste da pilha (AG-PDE-04). A outra amostra foi coletada em

material recém basculado, chamado na unidade de estoca (AG-PDE-05), sem a realização das operações de nivelamento e compactação. A esse grupo foram acrescidas as curvas granulométricas das amostras históricas PDE-122, PDE-123B, PDE-124A e SPDE-121.

O segundo grupo de amostras, foi coletado no interior do ponde, responsável pela sedimentação das partículas sólidas. Nesse local foram realizadas 3 coletas em 2021, sendo duas nas entradas de água (AG-PDE-02-21 e AG-PDE-03-21) e uma última na saída do ponde (AG-PDE-01-21), sendo replicadas no ano subsequênte obtendo as amostras AG-PDE-01-22, AG-PDE-02-22 e AG-PDE-03-22

As amostras coletadas são classificadas como deformadas pois não preservam o arranjo de grãos do solo, sendo coletadas por escarificação ou escavação direta, o que implica na destruição da estrutura intergranular e na alteração das condições de compacidade ou consistência naturais do material.

Coleta das amostras

Para realização das amostras de solo foram adotadas a norma 041/94 (DNER/DRDTC, 1994), no qual a área foi preliminarmente limpa para evitar a contaminação com matéria orgânica, tais como folhas e raízes.

Com auxílio de ferramentas manuais, pá de bico, enxada estreita e cavadeira articulada foram coletadas pelo menos 10 amostras de aproximadamente 2,5kg numa área de 1,0mx1,0m e profundidade variável.

Ao contrário do que se espera de uma investigação geotécnica, no qual uma profundidade padrão é definida para a coleta de todas as amostras, visando identificar similaridades nos horizontes do solo, para o presente estudo foram adotadas profundidades distintas em cada amostra, limitada à profundidade de material sedimentado no ponde ou em função da erodibilidade do material, independente do horizonte do solo.

Nas amostras coletadas dentro do ponde (AG-PDE-01, AG-PDE-02 e AG-PDE-03, nos anos de 2021 e 2022) o objetivo é de analisar apenas o material sedimentado no ponde, evitando contaminação com o material da fundação. Por esse motivo, as amostras foram coletadas mais superficiais certificando que era o material depositado, sem contaminação do material *in situ*.

Já as amostras localizadas no depósito preconizaram a erodibilidade pluvial de cada material. Em terrenos compactados e alta declividade como o caso da AG-PDE-04, coletado na

rampa de acesso oeste, o processo de erosão mais comum é de erosão laminar, promovendo o ravinamento com o tempo, dessa forma o material que compõe a base e sub-base do acesso são os mais propícios a erosão e consequentemente, de serem carreados para o ponde, sendo evitado coletar material do subleito.

No caso da amostra AG-PDE-05 o objetivo era analisar o comportamento do material basculado sem as operações de nivelamento ou compactação. Nesse caso a erodibilidade do material é alta, pois o solo encontra-se sem controle de drenagem, desfragmentado e empolado[2] favorecendo o processo de erosão e transporte, principalmente de finos e por este motivo apresentou profundidades mais elevadas (20cm). O núcleo dos montes basculados foi considerado como não representativo para o presente estudo, uma vez que estes não apresentam o mesmo nível de erodibilidade do material de face dos montes, sendo preservados *in situ*, sem atingir os dispositivos de drenagens e consequentemente as cortinas.

Definidas as profundidades o material foi disposto em uma lona preta 200 micras recortada num quadrado de 2,0mx2,0m. Então o para realizar a homogeneização do material cada uma das pontas da lona foi erguida a aproximadamente 1,5m, intercalando as pontas, em seguida o material é espalhado na lona com auxílio de uma enxada e repete-se o ciclo. Cada amostra passou por 10 ciclos de homogeneização.

Após o processo de homogeneização, foram coletadas amostras de aproximadamente 200gr acondicionados em vasilhames herméticos para determinação de teor de umidade natural. O restante do material, aproximadamente 25kg, foi ensacado, etiquetado e encaminhado para laboratório de análise de solos que realizou as etapas de preparação das amostras em laboratório. No laboratório uma nova homogeneização foi realizada, seguida do quarteamento para realização dos seguintes ensaios:

- Análise Granulométrica – ABNT NBR 7181 (2016).
- Massa Específica Real dos Grãos – ASTM D 854.
- Limites de Atterberg (LL, LP e IP) – ABNT NBR 7180/1984 e 6459/1984.
- Teor de Umidade Natural – ABNT NBR 16097 (2012).
- Massa Específica Aparente – NBR 10838.
- Índice de Vazios Máximo e Mínimo – NBR 12051 e NBR 12004

[2] Um solo empolado é um solo que aumenta de volume quando é removido do seu estado natural, por causa do aumento dos espaços vazios entre as partículas.

Estabilidade interna do solo

Kenney e Lau (1985), afirma que o diâmetro médio dos vazios de um solo é quatro vezes menor que o diâmetro médio das partículas que compõe o solo e assim, propõe que é possível avaliar o seu potencial de instabilidade a partir da avaliação da sua curva granulométrica.

A curva granulométrica é plotada num diagrama $FxD_{(log)}$, a partir de um par aleatório D e F_1 é possível determinar o outro par correspondente $4DxF_2$. Em seguida, outro diagrama é utilizado, no qual, a fração de massa entre os pontos D e 4D, denominado de H é cruzado com os valores de F e comparados com a reta F+H=1 e com a reta proposta por Loebotsjkov (1969) *apud* Kenney e Lau, (1985) H=1,3F que separa os materiais mais estáveis daqueles de granulometria instáveis internamente. Solos bem graduados (1<Cc<3) apresenta maior perda de partículas quando a curva HxF fica abaixo da curva H=1,3F no intervalo $0 \leq F \leq 0,2$. No entanto, solos mal graduados (Cc>3) e uniformes (Cu<2)o intervalo de maior perda de partículas pode ser dado por $0 \leq F \leq 0,3$ (KENNEY; LAU, 1985).

4.1.4. Dispositivos de controle de turbidez

Cortina de turbidez

A mineradora adquiriu no mercado, em novembro de 2020, anterior ao início do presente estudo, cortinas de turbidez com 3m de profundidade e 60m de comprimento total, divididos em 4 seções, sendo duas com 20m e duas com 10m, visando reduzir a turbidez efluente do ponde. Cada seção atua como um módulo individual que pode ser unido pelos conectores, dependendo do objetivo do projeto. Após análise prévia identificou a impossibilidade de instalação das cortinas no período de chuvas 2020/2021.

Ao postergar a instalação das cortinas para o período de chuvas 2021/2022, permitiu o início da pesquisa atual visando avaliar a efetividade e dificuldades associadas às estruturas denominadas de cortinas de turbidez e se possível dimensionar um sistema mais adequado em contrato plurianual de fornecimento, visando a otimização do projeto.

O sistema de drenagem pluvial do depósito estéril é responsável pela recepção de todas as águas de chuva captadas em 93ha, que associado a um regime pluvial irregular, impossibilita o controle da vazão de aporte. Dessa forma, presume-se que o principal risco associado ao experimento está na possibilidade de colapso das cortinas, seja pelo rompimento do cabo de

tensão, estouro do geotêxtil ou desprendimento dos pontos de ancoragem em decorrência de picos de vazão derivadas de chuvas intensas. A mitigação de tal risco conflita com a necessidade de manter uma alta eficiência do sistema. Este e outros pontos serão mais bem abordados no capítulo 6.

Em outras palavras, a configuração de instalação das cortinas foi analisada em conjunto com a equipe de segurança da mineradora e definido em virtude risco associado ao cenário proposto, não haviam dados suficientes, seja na mineradora, na empresa responsável pela confecção da cortina ou na literatura que corroborasse a instalação das cortinas em configurações mais efetivas, o que resultou na escolha de uma configuração em labirinto, pouco convencional e sabidamente elencada na literatura como de baixa efetividade (FRANCINGUES; PALERMO, 2005; JOHANSON, 1978; PILARCZYK, 2000).

A configuração adotada inicialmente (labirinto) reduz significativamente a capacidade de filtração do sistema, entretanto elevam o tempo de residência das partículas em meio fluido, favorecendo a sedimentação de partículas maiores.

Além da configuração de instalação em labirinto, a empresa responsável pela confecção da cortina sugeriu não atacar o fluxo ortogonalmente, alegando risco de estouro do geotêxtil em condições adversas, sendo posicionada as cortinas de forma oblíqua a direção do fluxo, em um ângulo próximo de 45º, reduzindo a carga hidráulica sob o geotêxtil, à medida que desloca o fluido pelas extremidades da cortina. Na tentativa de elevar a eficiência o fluxo do efluente seria deslocado por duas cortinas paralelas, uma com 40m (norte) e outra com 20m (sul) de comprimento.

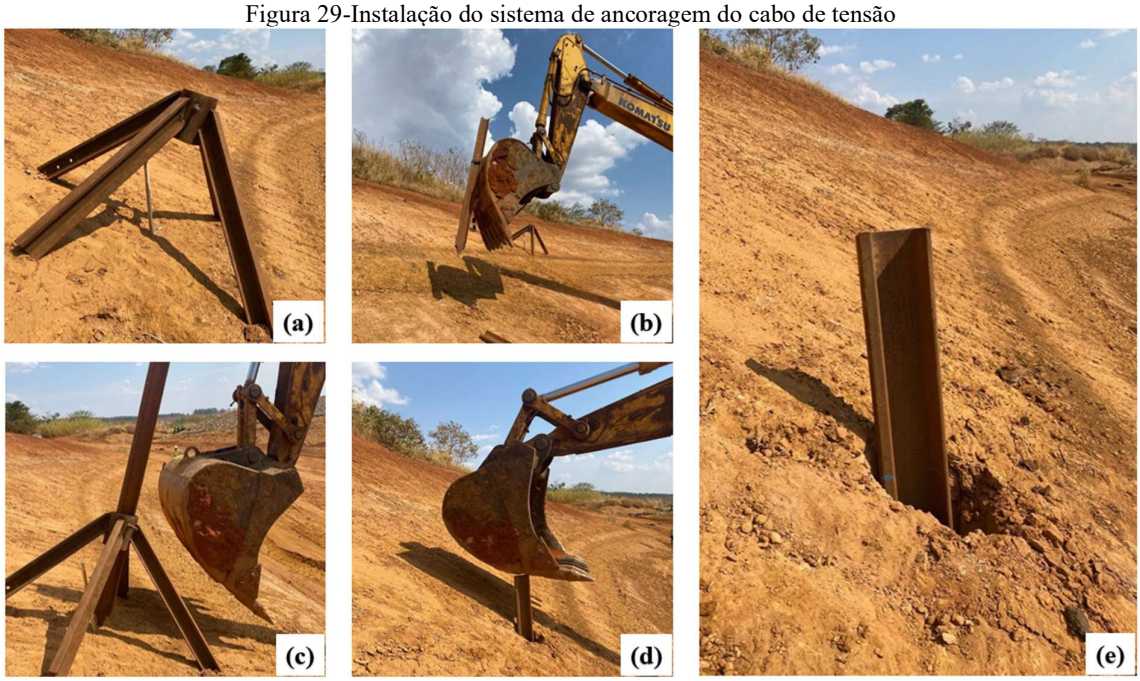
Após definição do local e configuração das cortinas iniciou-se o processo de instalação da cortina ainda com o ponde seco. A ideia inicial do projeto seria ancorar os flutuadores no leito do ponde e aguardar as chuvas que iriam promover o enchimento da estrutura, elevando cortinas para a sua posição planejada.

No entanto, as chuvas intensas, que ocorrem nos primeiros meses do período de chuva, apresentam alta capacidade de carreamento de sólidos e consequentemente, elevam o risco de formação de fluxo de detritos que poderia soterrar a cortina antes que esta estivesse disposta em sua configuração final de projeto.

Segundo Francingues e Palermo (2005) e Johanson (1978) em locais no qual as cortinas podem ser expostas a altas cargas hidráulicas é sugerido adotar um cabo de tensão com a função de dissipar as cargas nos pontos de ancoragem. Como esse foi um dos riscos elencados no início do projeto, optou-se pela adoção de um cabo de tensão superior ancorado nas margens da estrutura, as ponteiras de ancoragem foram confeccionadas a partir de trilhos de trem com 2,8m de comprimento, cravados no solo numa profundidade de 2,0m.

Para realizar a cravação das ponteiras foram utilizados centralizadores confeccionados na própria mineradora, visando evitar exposição de mão de obra na linha de fogo dos equipamentos. As ponteiras foram içadas com auxílio de cintas e uma retroescavadeira e posicionadas nos centralizadores para posterior cravação com o próprio equipamento (Figura 29).

Figura 29-Instalação do sistema de ancoragem do cabo de tensão



a) Centralizador do sistema de ancoragem b) Içamento da ponteira de ancoragem c) Posicionamento e centralização da ponteira d) Cravação da ponteira no solo; e) Ponteira finalizada aguardando cabo de aço.
Fonte: Acervo pessoal (setembro de 2021)

Em função da dificuldade de acesso e manuseio das cortinas, optou-se por utilizar uma amarração do cabo de aço que permitisse, em caso de uma emergência, ser rapidamente retirado, com auxílio de algum equipamento disponível nos arredores. Dessa forma, adotou-se a amarração na Figura 30 - a, com utilização de clipes grampo e sapatilhas 1/2” de tal forma que o cabo pudesse ser retirado dos pontos de ancoragem com auxílio de uma escavadeira preservando a estrutura do ponde.

Figura 30-Instalação das cortinas no ponde



a) Amarração dos cabos de tensão; b) Fixação dos cabos de tensão na ancoragem; c) Posicionamento dos cabos de tensão ao longo do ponde; d) Posicionamento e amarração da cortina no cabo de tensão; e) Tensionamento do cabo de aço; f) Cortinas instaladas aguardando o enchimento do ponde.
Fonte: Acervo pessoal (outubro de 2021)

Após fixado no flanco leste do ponde (Figura 30 - b), os cabos foram esticados no fundo do ponde até os pontos de ancoragem no flanco oeste da estrutura (Figura 30 - c). As cortinas foram posicionadas a jusante dos cabos de aço (Figura 30 - d), presas entre si por conectores de alumínio na parte dos flutuadores e por cordas de náilon naval com 25mm de diâmetro e amarração trançada transversal pelos olhais com amarração final em nó de pescador para unir as duas pontas.

Após amarração da cortina, o cabo de tensão foi tracionado com auxílio de uma retroescavadeira (Figura 30 - e) até sua posição de projeto, seguido da amarração do cabo de aço, similar ao realizado no flanco leste, permitindo a disposição das cortinas para aguardar o enchimento do ponde (Figura 30 - f).

As cortinas foram fixadas ao cabo de tensão em cada extremidade utilizando conjuntos de clipes grampo de ½” presos ao cabo de aço e as correntes posicionadas na base dos conectores de alumínio. A cada 5m de cortina, foi realizada uma amarração intermediária da cortina com o cabo de tensão utilizando corda de nylon naval com 25mm de diâmetro e comprimento médio de 1,5m utilizando nó Lais de guia para fixação (Figura 31).

Figura 31-Detalhe das amarrações intermediárias a o cabo de tensão



Fonte: Acervo pessoal (outubro de 2021)

As cortinas de turbidez adquiridas são formadas por lances com 5000mm de comprimento (linear) e saia de 3000mm, mantendo uma borda livre mínima de 300 mm, saia min. de 3000 mm. As cortinas são confeccionadas em lona vinílica composta com tecido de poliéster de alta tenacidade, revestido de PVC, em ambas as faces, lastro de correntes de elos galvanizados a fogo de 9mm, conectores padrão ASTM, em alumínio naval, conectáveis através de sistema pino-trava, manilha, alças superiores e flutuadores ultraleves em polietileno expandido. As especificações técnicas são dispostas na Tabela 15.

A porção externa da cortina de turbidez é confeccionada em tecido com base de poliéster, com recobrimento duplo em plastificante polimérico e borracha nitrílica (PVC), as lonas empregadas na fabricação das cortinas cumprem minimamente todas as especificações e normatizações descritas na Tabela 15.

A porção central da cortina é confeccionada em geotêxtil tecido PP 105/105 DW da Huesker, composto por laminetes de polipropileno de alta tenacidade, alta resistência a tração, elevada permeabilidade, baixa fluência, ultra-estabilizado e anti-UV. A trama do geotêxtil tecido utilizado, denominada de DW, confere ao material elevada permeabilidade a líquidos, ao mesmo tempo que apresenta abertura de poros aparente significativamente baixa, conferindo alto poder de retenção de sólidos.

Tabela 15-Especificações técnicas das cortinas de turbidez.

Componente	Propriedades	Especificações técnicas	Unidade	Método
LONA LARANJA	Gramatura	1230	g/m²	DIM EN 22.286
	Espessura	1	mm	DIM EN 22.286
	largura	1450	mm	DIM EN 22.286
	Adesão - Longitudinal e transversal	≥4.0	kg/5cm	DIM EN 53.357/A
	Resistência à ruptura - Longitudinal	400	kgf/5cm	DIM EN 53.357/A
	Resistência à ruptura - Transversal	390	kgf/5cm	DIM EN 53.354
	Alongamento à ruptura - Longitudinal e Transversal	35	%	DIM EN 53.354
GEOTÊXTIL TECIDO	Matéria prima - Geotêxtil tecido	laminetes PP ultra-estabilizado anti-UV		
	Gramatura	≥440	g/m²	ISO 9864
	Resistência a tração - longitudinal e transversal	105	kN/m	NBR ISO 10.319
	Deformação na resistência nominal	≤10%	%	NBR ISO 10.319
	Condutividade hidráulica	$2x10^{-3}$m/s	m/s	NBR ISO 11.058
	Abertura de filtração característica	0.24mm	mm	NBR ISO 12.956
	Permeabilidade	$20x10^{-3}$	m/s	
	Resistência a UV (residual após 4.300h de exposição)	>80%	%	DIN EN 12.224
	Costuras circuferenciais e inferior	Sobreposta, seis linhas de costura de poliéster de alta tenacidade		
	Costuras das extremidades	Tipo Prayer, seis linhas de costura de poliéster de alta tenacidade e costura de reforço		

Fonte: dados fornecidos pela projetista (2021)

Na parte superior das cortinas foram instaladas alças que proporcionam mais agilidade e facilidade em sua movimentação e lançamento, bem como, maior segurança ergonômica e operacional aos seus operadores (Figura 32).

O lastro da cortina de turbidez é formado por corrente de elos com diâmetro mínimo de 9,0 mm, galvanizada a quente, com carga de ruptura mínima de 2.500 kgf.

Para garantir a flutuabilidade do sistema foram adotados flutuadores estanques, ultraleves e cilíndricos com densidade 19kg/m³, fabricados em manta flexível de polipropileno com espessura de aproximadamente 10 mm, formando gomos com mantas de células estantes fechadas, envolvidos por lona, igualmente distantes e separados por soldas em formato vertical à barreira onde são instaladas as alças, formando câmaras individuais que somadas ao projeto

construtivo do flutuador, impedem o afundamento total da barreira em casos de rasgamento parcial da lona.

Figura 32-Cortina de turbidez sendo conferida antes da instalação.



Fonte: Acervo pessoal (setembro de 2021)

Os acoplamentos entre extremidades são realizados por conectores de engate rápido, em conformidade com a Norma ASTM F-962, fabricados em alumínio extrudado, isentos de rebarbas e/ou cantos vivos, pinos de trava dos conectores de diâmetro 3/8".

As fixações são realizadas com porcas sextavadas, arruelas lisas e parafusos (M6, M8 e M12), em aço bi cromatizado e inox AISI 304.

Para realizar a ancoragem optou-se pela adoção de um cabo de tensão superior, composto por um cabo de aço de ½" tensionado à ´30° do eixo do fluxo, ancorado nas margens da estrutura em barras de aço com 2,8m de comprimento, cravado no solo com 2,0m de profundidade (Figura 33).

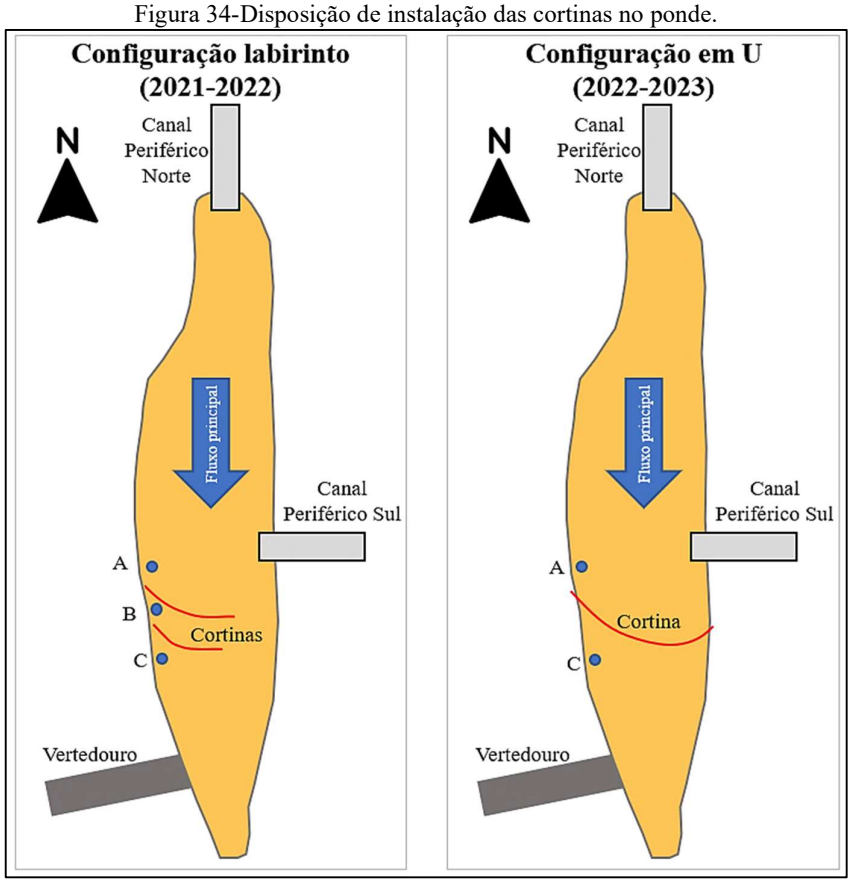
Figura 33-Cravação dos trilhos utilizados no sistema de ancoragem nas margens



Fonte: Acervo Pessoal (setembro de 2021)

Antes do período de chuvas subsequente (2022-2023) as cortinas foram limpas e reinstaladas adotando uma configuração em U utilizando os mesmos mecanismos e acessórios de ancoragem. A disposição de instalação pode ser observada na Figura 34.

Figura 34-Disposição de instalação das cortinas no ponde.



Fonte: Autoria Própria

Figura 35-Instalação da cortina de turbidez em setembro de 2022.
Acima configuração de instalação; Abaixo (*esq.*) detalhe das amarrações (*dir.*) Detalhe da cortina limpa.



Fonte: Acervo Pessoal (setembro de 2021)

Os dois anos de experimento permitiu a avaliação da efetividade do referido dispositivo na redução de turbidez do efluente pós-chuvas, proveniente da drenagem superficial da pilha de estéril.

Cortina de controle de sedimentos instalada

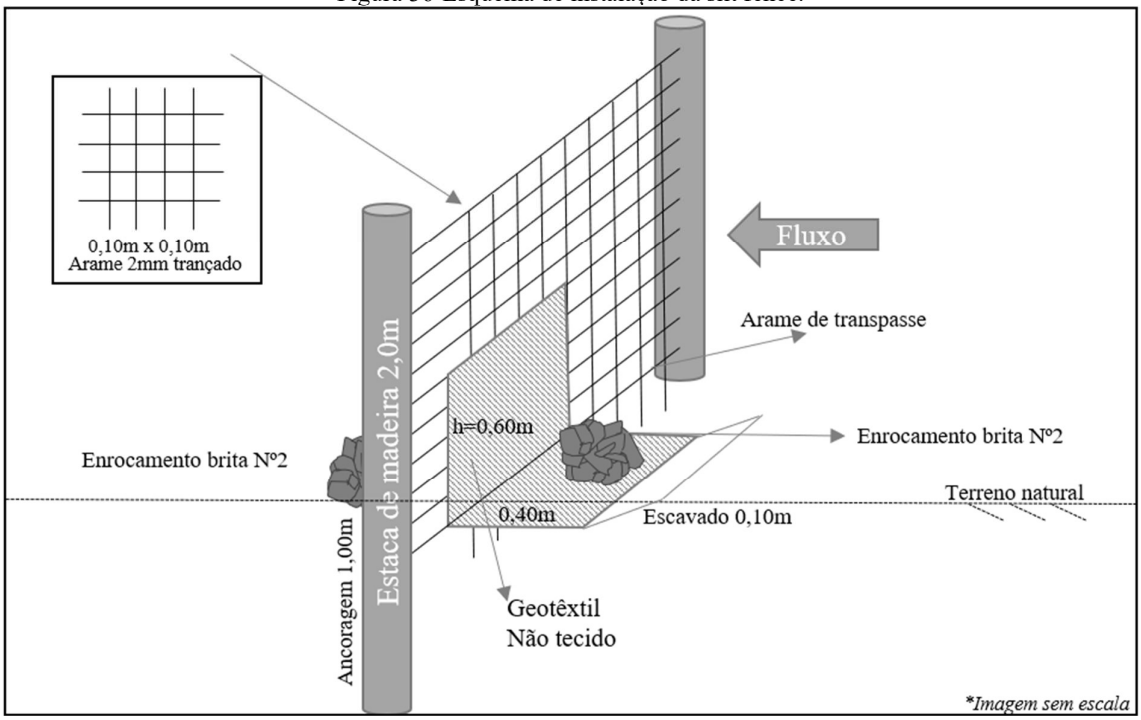
A confecção da cortina de controle de sedimentos se deu a partir da necessidade de reduzir a turbidez no vertedouro da estrutura sendo confeccionada a cortina na entrada do extravasor.

Após o início do período de chuvas evidenciou-se que as cortinas de turbidez não estavam performando conforme o esperado, e sem acesso as cortinas para correção da geometria optou-se pela confecção de estrutura secundária de filtração, sendo adotada a cortina de controle de sedimento, ou *silt fence*, como solução proposta.

Em 28/12/2021 foi instalada a cortina de controle de sedimento na entrada do extravasor do ponde, com 24m de comprimento utilizando materiais disponíveis na unidade e geotêxtil não tecido de polipropileno GF-26, cedido pela Ober.

Para definição da geometria de instalação adotou-se a metodologia proposta por Richardson e Middlebrooks (1991), adaptada as realidades do projeto sendo listadas a seguir (Figura 36):

Figura 36-Esquema de instalação da silt fence.



Fonte: Autoria Própria

Os postes de amarração foram confeccionados a partir de mourões de madeira com 2m de comprimento e 10cm de diâmetro. Os postes foram cravados 1,0m dentro do solo e distantes 3m um do outro, valor supera proposto por Richardson e Middlebrooks (1991), em função de restrições operacionais que serão abordados com mais detalhe no capítulo 6.

Para elevar a resistência a tração do sistema adotou-se uma malha trançada de arame galvanizado de 2,0mm em células de 10 cm x 10 cm.

Para fixação do geotêxtil, rente ao solo foi escavado uma trincheira a montante da estrutura com 10cm de profundidade e 40cm de largura ao longo de toda a *silt fence* e posicionado um arame de transpasse na base dos postes de fixação (Figura 37).

Figura 37-Processo de instalação da cortina de controle de sedimento instalada na entrada do extravasor.



a) Amarração da malha trançada de arame galvanizado; b) Posicionamento do enrocamento; c) Cortina de controle de sedimento finalizada.
Fonte: Acervo pessoal (dezembro de 2021)
Figura 38-Cortina de controle de sedimento instalada na entrada do extravasor.



Fonte: Acervo pessoal (dezembro de 2021)

Após posicionado o geotêxtil foi fixado na malha trançada utilizando arame galvanizado 2,0 mm na extremidade superior e enrocamento com brita 2 ao longo de toda trincheira a montante. Uma camada com cerca de 20 cm de brita foi colocada acima do terreno natural em ambos os lados da *silte fence* visando proteger a base do geotêxtil de processos erosivos (Figura 38).

4.2. Caracterização dos geotêxteis utilizados

4.2.1. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As amostras de geotêxtil, tecido e não tecido, utilizadas no presente estudo foram secas ao ar, em local protegido, para posterior impregnação com carbono possibilitando serem analisadas no microscópio eletrônico de varredura (Figura 39).

Figura 39-Amostras de geotêxtil tecido preparadas para a microscopia.



Fonte: Acervo pessoal prof. Maria das Graças Gardoni (2023).

Durante a MEV identificou-se que a configuração do equipamento Quanto200 para as amostras disponíveis era adotar alto vácuo com corrente de 15kV.

A escolha das amostras de geotêxtil a serem submetidas a microscopia foi feita tomando-se aleatoriamente 2 pontos dos espécimes disponíveis, evitando-se as bordas, com dimensões de 10cm de largura por 15cm de comprimento. Também foram evitadas porções com danos extremos, impregnação excessiva ou quaisquer aspectos que pudesse enviesar o resultado da análise, gerando as combinações de geotêxtil e solo expostas na Tabela 16.

Dentre as amostras apenas 9 foram analisadas por microscopia. Devido a estrutura tecida do geotêxtil as amostras para análise apresentaram tamanhos maiores, não sendo necessária a repetição da microscopia, como é realizado para amostras pequenas. As amostras analisadas foram:

- Geotêxtil não tecido - M2300745, M2300746 e M2300747
- Geotêxtil tecido - M2300750, M2300751, M2300753, M2300755, M2300757 e M2300759

Tabela 16-Amostras analisadas pela microscopia eletrônica

Amostra	Geotêxtil	Identificação da amostra
M2300745	GF 26/500	1 – Geotextil não tecido - amostra virgem
M2300746	GF 26/500	2A – Geotêxtil não tecido impregnado c/solo + Fluido direto Face Montante
M2300747	GF 26/500	2B – Geotêxtil não tecido impregnado c/solo + Fluido direto Face Montante
M2300748	GF 26/500	3A - Geotêxtil não tecido impregnado c/solo Face Juzante
M2300749	GF 26/500	3B - Geotêxtil não tecido impregnado c/solo Face Juzante
M2300750	PP 105/105 DW	4 - Geotextil tecido virgem
M2300751	PP 105/105 DW	5A – Geotextil cortina impregnado c/solo + Fluxo direto Face montante
M2300752	PP 105/105 DW	5B – Geotextil cortina impregnado c/solo + Fluxo direto Face Montante
M2300753	PP 105/105 DW	6A - Geotextil cortina impregnado c/solo Face Juzante Fluxo passante
M2300754	PP 105/105 DW	6B - Geotextil cortina impregnado c/solo Face Juzante Fluxo passante
M2300755	PP 105/105 DW	7A - Geotextil impregnado c/solo – amostra após limpeza (Fator Redução) +Fluxo direto Face montante
M2300756	PP 105/105 DW	7B - Geotextil impregnado c/solo – amostra após limpeza (Fator Redução) +Fluxo direto Face montante
M2300757	PP 105/105 DW	8A - Geotextil impregnado c/solo – amostra após limpeza (Fator Redução) Face Juzante
M2300758	PP 105/105 DW	8B - Geotextil impregnado c/solo – amostra após limpeza (Fator Redução) Face Juzante
M2300759	PP 105/105 DW	9A - Geotextil Tecido Amostra exposta ao sol Face exposta ao sol
M2300760	PP 105/105 DW	9B - Geotextil Tecido Amostra exposta ao sol Face exposta ao sol

Fonte: Autoria própria

4.2.2. Ensaios de tração

Foram realizados ensaios de tração em faixa estreita segundo a norma ASTM D5035-11 (2019)- *"Standard Test Method for Breaking Force and Elongation of Textile Fabrics (Strip Method)"* no geotêxtil tecido aplicado na cortina de turbidez e em geotêxtil de mesmo lote exposto somente as condições de intempéries (Sol e chuva). Os ensaios foram realizados no laboratório de Geotecnia da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar).

Para o ensaio de tração em faixa estreita, os 40 corpos de prova do geotêxtil tecido foram preparados com 5 cm de largura e fixados a uma distância entre de 7,5 cm entre os mordentes do equipamento e velocidade de tração no ensaio de 300 mm/min (Figura 40 e Figura 41).

Figura 40-Marcação das amostras para ensaio de tração



Fonte: Acervo pessoal prof. Natália Correia (2023)

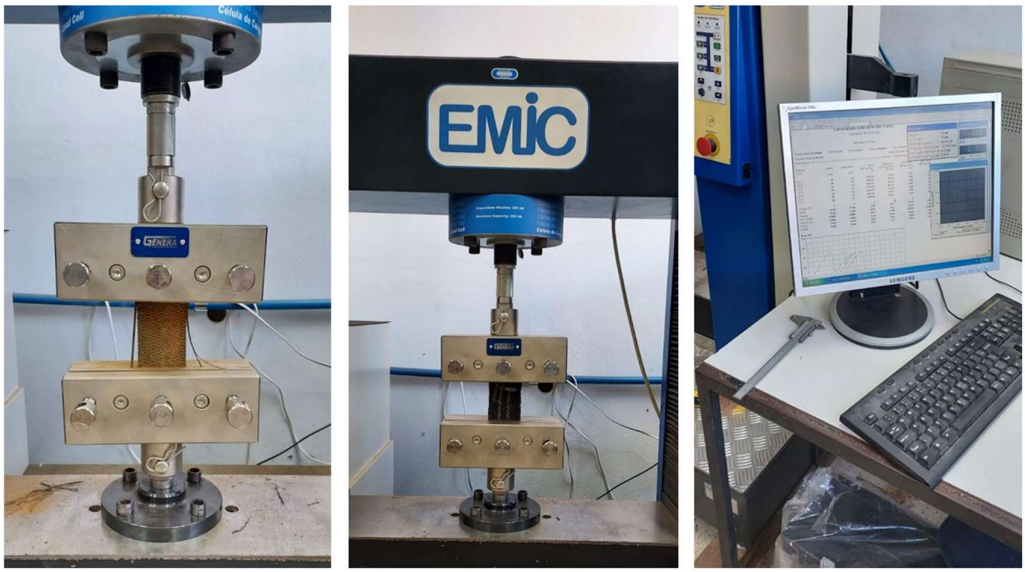
Figura 41-Corte e separação das amostras para o ensaio de tração.



Fonte: Acervo pessoal prof. Natália Correia (2023)

Os ensaios foram realizados utilizando uma máquina universal de ensaio EMIC DL30000N que oferece até 300 kN de força para a realização de ensaios de tração/compressão, entre outros, mediante acessórios compatíveis. (Figura 42).

Figura 42-Ensaio de tração realizado pela UFSCAR



Fonte: Acervo pessoal prof. Natália Correia (2023)

Tabela 17-Amostras de tração

Amostra	Condição	Direção	Amostra	Condição	Direção
CP01	Obra	Longitudinal	CP01	Exposta ao sol	Longitudinal
CP02	Obra	Longitudinal	CP02	Exposta ao sol	Longitudinal
CP03	Obra	Longitudinal	CP03	Exposta ao sol	Longitudinal
CP04	Obra	Longitudinal	CP04	Exposta ao sol	Longitudinal
CP05	Obra	Longitudinal	CP05	Exposta ao sol	Longitudinal
CP06	Obra	Longitudinal	CP06	Exposta ao sol	Longitudinal
CP07	Obra	Longitudinal	CP07	Exposta ao sol	Longitudinal
CP08	Obra	Longitudinal	CP08	Exposta ao sol	Longitudinal
CP09	Obra	Longitudinal	CP09	Exposta ao sol	Longitudinal
CP10	Obra	Longitudinal	CP10	Exposta ao sol	Longitudinal
CP01	Obra	Tranversal	CP01	Exposta ao sol	Tranversal
CP02	Obra	Tranversal	CP02	Exposta ao sol	Tranversal
CP03	Obra	Tranversal	CP03	Exposta ao sol	Tranversal
CP04	Obra	Tranversal	CP04	Exposta ao sol	Tranversal
CP05	Obra	Tranversal	CP05	Exposta ao sol	Tranversal
CP06	Obra	Tranversal	CP06	Exposta ao sol	Tranversal
CP07	Obra	Tranversal	CP07	Exposta ao sol	Tranversal
CP08	Obra	Tranversal	CP08	Exposta ao sol	Tranversal
CP09	Obra	Tranversal	CP09	Exposta ao sol	Tranversal
CP10	Obra	Tranversal	CP10	Exposta ao sol	Tranversal

Fonte: Autoria própria

A escolha das amostras de geotêxtil a serem submetidas a tração foi feita tomando-se 10 corpos de prova na direção transversal e outros 10 na direção longitudinal do geotêxtil tecido, coletados nas duas amostras de geotêxtil disponíveis (exposta ao sol e da obra, utilizada na cortina), gerando as combinações de geotêxtil e solo expostas na Tabela 17.

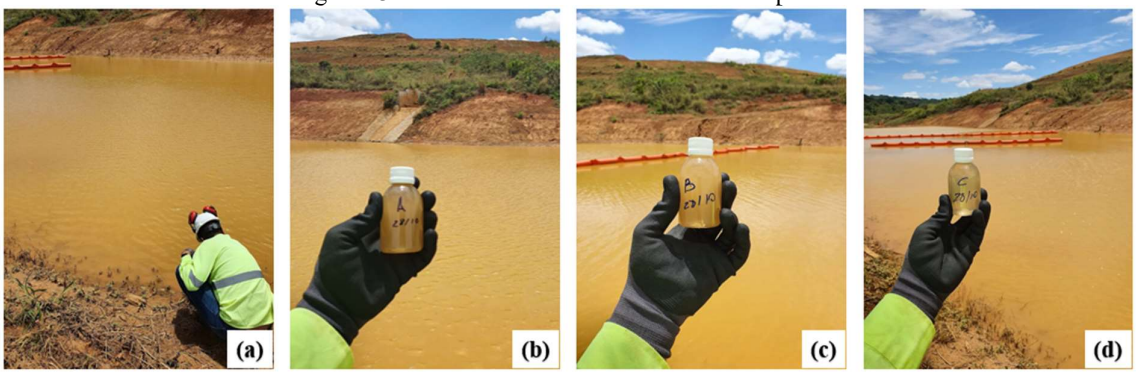
Os resultados obtidos nos ensaios de tração foram então comparados com os resultados disponibilizados pelo fabricante do geotêxtil tecido para avaliação da degradação dos geotêxteis analisados.

4.3. Análises experimentais

4.3.1. Análise do efluente líquido

Para efeito do presente estudo, são coletadas 03 amostras, com periodicidade mínima semanal, sendo 01 a montante (ponto A), 01 entre as cortinas (ponto B) e 1 a jusante das cortinas (ponto C), todos localizados no interior do ponde, na margem oeste e perpendiculares ao fluxo da água conforme Figura 43.

Figura 43-Coletas de amostras sobrenadante no ponde.



a) Coleta de amostra manual; b) Ponto de coleta A, a montante das cortinas; c) Ponto de coleta B entre as cortinas; d) Ponto de coleta C, a jusante das cortinas.
Fonte: Acervo pessoal (outubro de 2021)

Logo após a instalação das cortinas as chuvas ocorridas no final de outubro de 2021 impediram a confecção de linhas de vida nas margens da estrutura limitando as coletas ao lado oeste da estrutura, com acesso a pé permitido. Com a evolução do período de chuvas e variações do nível da água no interior do ponde, tornou-se necessária a adoção de um cabo extensor para coleta de amostra sobrenadante (Figura 44).

Para obtenção dos parâmetros físico-químicos do efluente foi utilizado o multiparâmetro ProDSS utiliza tecnologia inteligente, onde o sensor é substituível pelo usuário que pode ser conectado em qualquer porta e automaticamente reconhecido pela coletora, mantendo os dados

de calibração. O equipamento é designado para uso em aplicações, tais como águas superficiais, subterrâneas, litoral (águas salinas) e águas residuais(TECNAL, 2021).

Figura 44-Cabo extensor para coleta segura de água na margem oeste do ponde.



Fonte: Acervo pessoal (novembro de 2021)

Os parâmetros físicos e químicos analisados no presente estudo foram coletados adotando 4 sensores

- ProDSS Condutivity/Temp.
  - Parâmetros: Condutividade elétrica e temperatura
  - Calibração: Setembro de 2021
- ProDSS Turbidity
  - Parâmetros: Turbidez
  - Calibração: Setembro de 2021
- ProDSS Opitical DO
  - Parâmetros: Oxigênio dissolvido
  - Calibração: Outubro de 2021
- ProDSS pH+ORP
  - Parâmetros: pH e ORP
  - Calibração: Outubro de 2021

4.3.2. Análise de turbidez e efetividade das cortinas

As coletas de dados de turbidez foram inseridas na sistemática de monitoramento de drenagem pluvial adotada pela mineradora, com o objetivo de prevenir e caracterizar eventos anômalos que podem impactar na pilha de estéril e, consequentemente, o presente estudo. Para análise de efetividade do sistema, são coletadas amostras com periodicidade mínima semanal para avaliação da turbidez na fase sobrenadante (Figura 45).

Figura 45-Coleta de turbidez com sonda multiparâmetro YSI Professional Plus PRO-DSS



Fonte: Acervo pessoal (novembro de 2021)

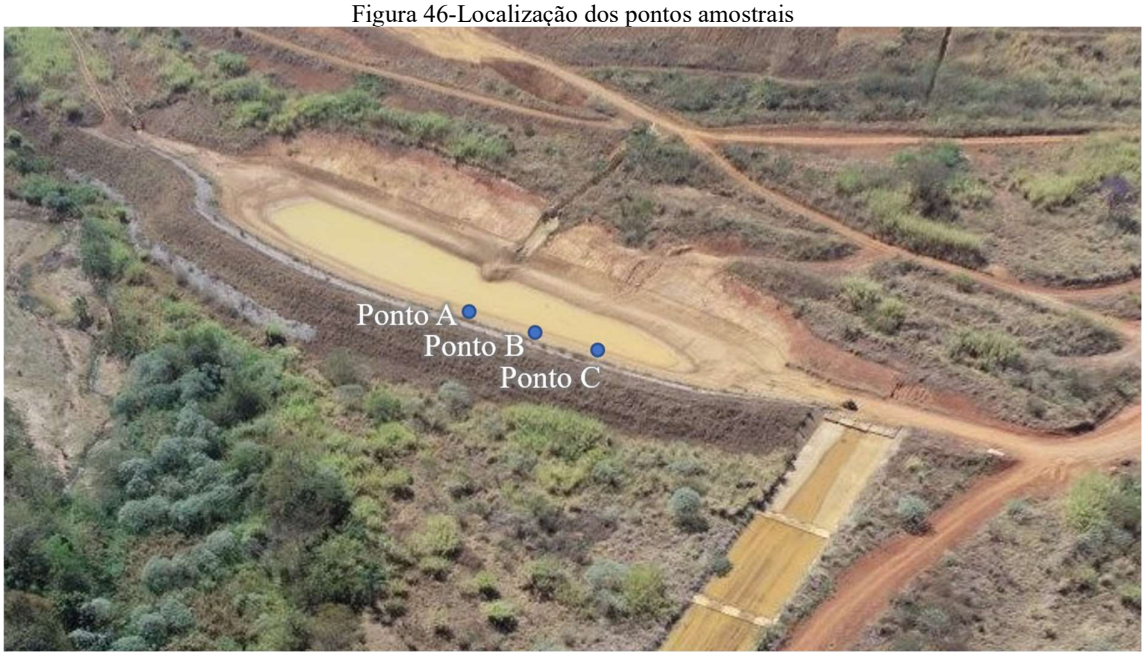
As amostras coletadas foram avaliadas em campo utilizando um analisador multiparâmetro portátil YSI-PRO DSS, sendo coletadas informações de temperatura ((-5) - 70°C); condutividade (0,01 - 200 µS/cm); salinidade (0 - 70 ppt); TDS (0 - 100 mg/L): oxigênio dissolvido (0 - 50 mg/L) e turbidez (0 – 4000NTU)(TECNAL, 2021).

Para realizar a coleta os sensores são imersos nas amostras coletadas e agitados vagarosamente a fim de evitar a formação de bolhas que possam interferir no resultado analítico. Os sensores ficam imersos por cerca de 1min até que o multiparâmetro estabilize todos os parâmetros. Prosseguindo com o armazenamento da coleta. Os dados coletados são então transferidos para o excel para formação de banco de dados, para posterior tratamento estatístico no Minitab19.

Os locais de coleta das amostras foram determinados de tal forma à obter valores a montante e a jusante de cada estrutura de clarificação para avaliação de sua eficiência (Figura 34). Em função do colapso da cortina contenção de sedimentos (*silt fence*) a metodologia abordada é focada na configuração das cortinas de turbidez, dividindo os dados obtidos em dois cenários (Figura 46).

No cenário 01, as duas cortinas foram dispostas em configuração de labirinto, praticamente paralelas, durante o período de chuvas 2021-2022, permitindo o fluxo livre do efluente próximo as margens do ponde.

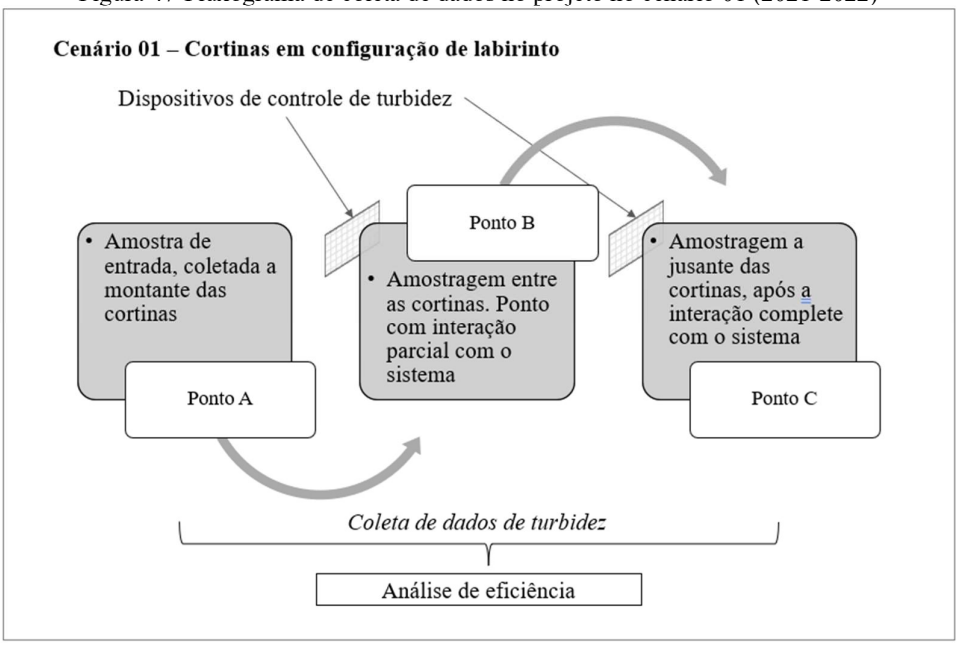
Figura 46-Localização dos pontos amostrais



Fonte: Acervo pessoal

Para identificação da eficiência o ponto de referência denominado de “A”, foi alocado distando cerca de 5m a montante de ambas as cortinas. Na sequência o ponto “B” localizado entre as cortinas, permite a avaliação de apenas 1 cortina em labirinto, enquanto o ponto “C”, 5m a jusante da segunda cortina permite a avaliação da eficiência de todo o sistema (Figura 47).

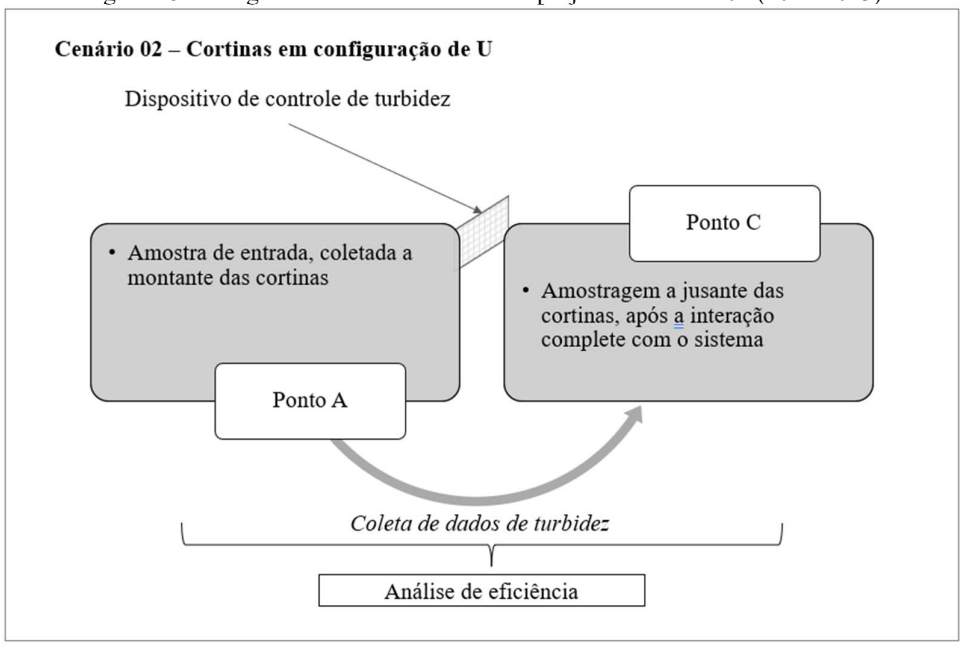
Figura 47-Fluxograma de coleta de dados no projeto no cenário 01 (2021-2022)



Fonte: Autoria Própria

No cenário 02, as cortinas foram unidas numa única seção em configuração de "U", impedindo o fluxo superficial próximo da margem, sem que este passe pelo sistema de clarificação. Sendo assim apenas os pontos "A" e "C" permaneceram sendo medidos, para avaliar a eficiência total do sistema nessa configuração (Figura 48).

Figura 48-Fluxograma de coleta de dados no projeto no cenário 02 (2022-2023)



Fonte: Autoria Própria

Os dados coletados compõem um banco de dados que possibilita a execução de um modelo de variação % de turbidez por seção de cortinas.

Segundo Oliveira et al., (2018, 2020a, 2020b) é possível calcular a filtração efetiva das barreiras adotando a seguinte equação:

$$F_i = \frac{T_a - T_d}{T_a}$$ Equação [10]

Onde:

- F_i corresponde a variação % de turbidez para cada cortina
- T_a é a turbidez anterior a cortina
- T_d a turbidez após a cortina que está sendo avaliada.

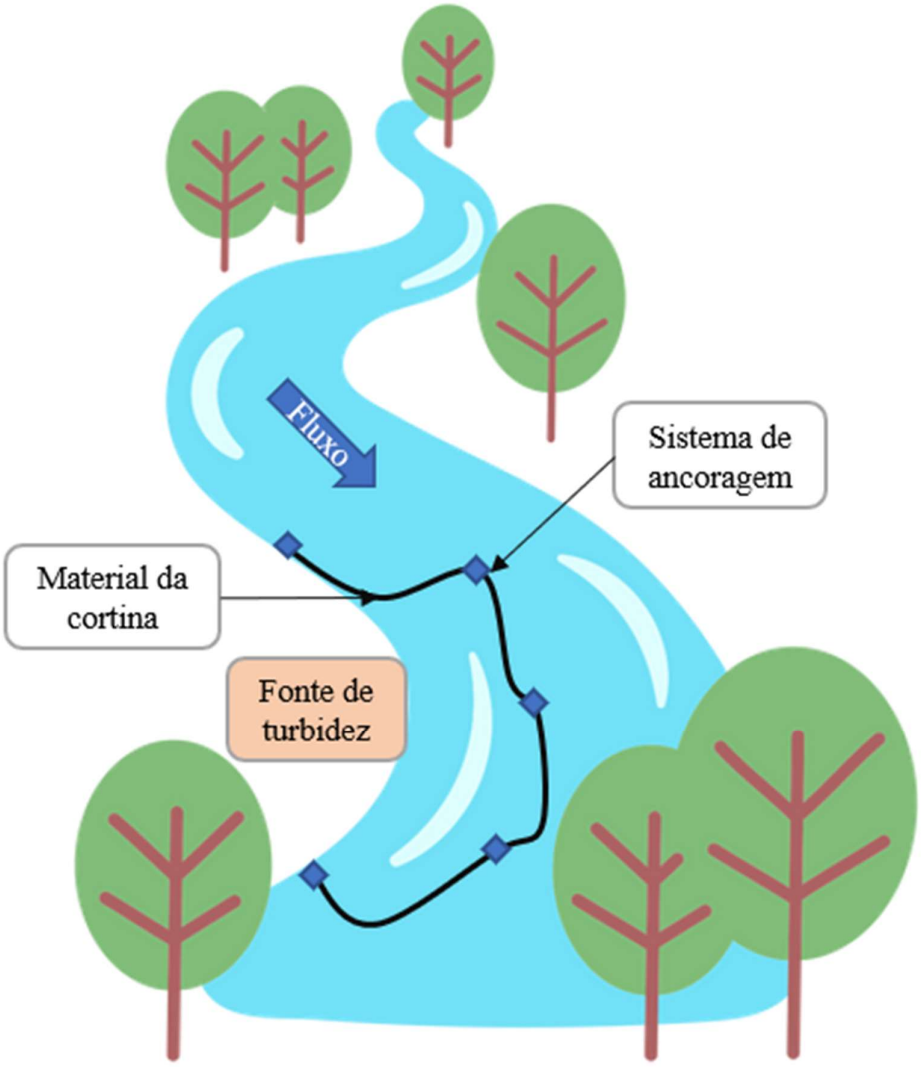
Para garantir confiabilidade dos dados coletados a sonda multiparâmetro foi calibrada entre os meses de setembro de 2021 e outubro de 2022, dependendo do sensor. Cada sensor é imerso em água por um período de aproximadamente 1min até que o aparelho estabilize a coleta de dados, que então é gravado na memória interna que posteriormente é passado para o Excel.

Quando não foi mais possível a coleta direta no ponde, por questões de segurança, a amostra foi coletada por intermédio de um vasilhame com cerca de 2 litros de capacidade para análise na margem do ponde.

4.4. Premissas para dimensionamento de novas estruturas

Segundo a DTMB (2019), as cortinas de turbidez devem ser utilizadas durante a realização de obras que geram sedimentos adjacentes a recursos hídricos nos quais outros métodos de contenção não são aplicáveis. As cortinas atuam prevenindo o escoamento e carreamento de particulado fino para as áreas adjacentes, preservando os recursos hídricos. As cortinas devem ser ancoradas nas margens e sempre que necessário colocadas juntas, em configuração paralela ao fluxo, e não perpendicular, visando a integridade do sistema (Figura 49). A borda inferior da barreira deve estar 0,30m acima do fundo do recurso hídrico. Para tanto, dispositivos de flutuação são usados para manter a cortina suspensa na água. Em águas rasas é possível adotar a cortina sem a utilização dos mecanismos de flutuação, no entanto, as estruturas não podem ser superiores a 1,8m.

Figura 49-Disposição de cortinas de turbidez sugerida pela DTMB



Fonte: Modificado de DTMB (2019)

O departamento de transporte do estado de Nova Iorque (NYSDOT, 2018) apresenta em seu manual de projetos geotécnicos critérios a serem adotados no dimensionamento de cortinas de turbidez.

A princípio, geotêxteis tecidos ou não tecidos podem ser utilizados na confecção de cortinas de turbidez, devendo apresentar permissividade suficiente para possibilitar a passagem de água, um AOS que retenha os solos desejados e resistência suficiente para suportar as tensões de instalação e aquelas devidas às cargas de água e sedimentos (NYSDOT, 2018)

A instalação deve ser avaliada para determinar se é uma instalação não crítica / não severa ou crítica / severa. Em instalações críticas/severas, é necessário adotar o procedimento a seguir para dimensionamento da estrutura(JOHANSON, 1978; PILARCZYK, 2000):

- Determinar a curva granulométrica do solo a ser filtrado.
- Avaliar as condições ambientais esperadas, como a duração prevista da exposição à luz solar.
- Determinar a velocidade, direção e volume de descarga de água.
- Estimar a profundidade da água e os níveis de turbidez.
- Avaliar os efeitos da ação das ondas devido ao tráfego aquaviário.
- Determinar a natureza do sedimento de fundo e da vegetação.
- Avaliar as condições do vento.

Os seguintes critérios devem ser avaliados na seleção do geotêxtil para instalação como cortina de turbidez:

1. Critérios de retenção do solo:
    a. Para geotêxteis tecidos, um AOS = D_{25} do solo
    b. Para geotêxteis não tecidos, um AOS = $1.8D_{85}$ do solo
    c. O D_{85} deve ser determinado a partir do solo que passa na peneira #10 (2,0mm).
2. Critérios de permissividade
    a. Permissividade = 10 L/h (taxa de fluxo volumétrico de água) / área da seção transversal da cortina de turbidez
3. Critério de colmatação
    a. Use os requisitos de AOS maiores do Nº 1.

Na construção de uma cortina de turbidez, alguma forma de material de flutuação (por exemplo, colares de isopor etc.) é fixada na parte superior da cortina de turbidez e um lastro (por exemplo, corrente pesada) fixada na parte inferior. Ambos servem para segurar a cortina no lugar.

As cortinas de turbidez não são recomendadas nas seguintes condições:

- Operações em mar aberto.
- Operações onde as correntes excedem 1,1 mph (0,5m/s).
- Em áreas frequentemente expostas a ventos fortes e grandes ondas quebrando.
- Em áreas onde o movimento frequente da cortina pode ser necessário

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

No setor de mineração os métodos de minimização do parâmetro de turbidez no efluente gerado pelos sistemas de drenagens, são baseados na existência de barragens de rejeito e estruturas de polimento, que estabilizam e clarificam o efluente gerado pela chuva (água pluvial + sedimentos carreados).

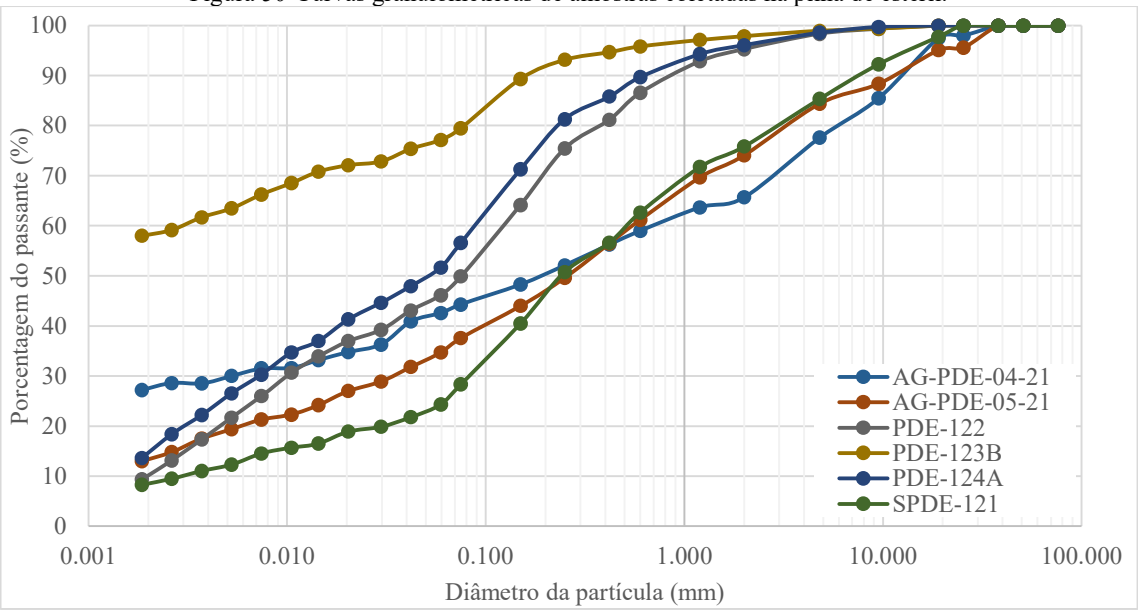
Variações na geometria, na cobertura vegetal e uso do solo no depósito afetam a taxa de sedimentos disponibilizados e remobilizados pelo sistema de drenagem superficiais, assim como temperatura no ponde, direção dos ventos, vertimento da estrutura e integridade das cortinas de turbidez afetam a clarificação do efluente gerado. Sendo assim, a interpretação isolada dos dados pode acarretar entendimentos equivocados, devendo cruzar os dados na identificação de cenários favoráveis e contrários ao desenvolvimento do experimento.

5.1. Dados coletados

5.1.1. Granulometria das amostras

As amostras de material depositado na pilha de estéril apresentam comportamento granulométrico que demonstram a alta heterogeneidade do material depositado na pilha de estéril (Figura 50).

Figura 50-Curvas granulométricas de amostras coletadas na pilha de estéril.

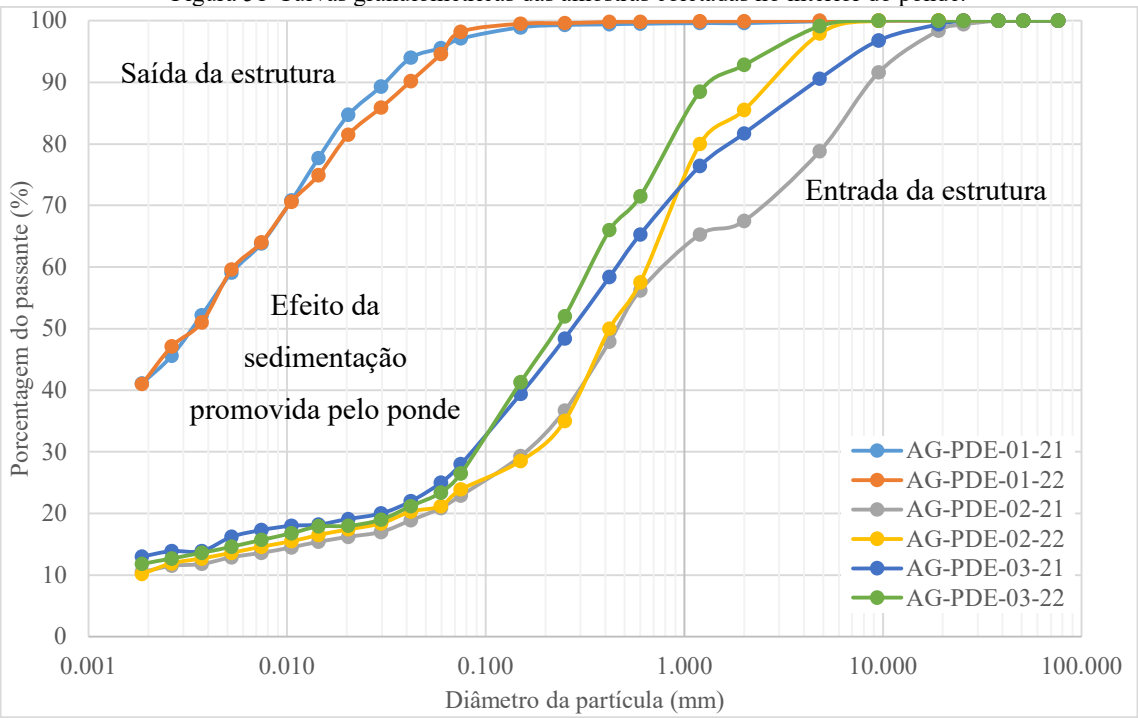


Fonte: autoria própria

A heterogeneidade do material depositado se dá em função do avanço de lavra da mineração, que apresenta diferentes frentes de estéril direcionadas para a pilha. Essa variabilidade não é considerada no controle do material depositado formando uma área fonte de material erodível também variável, que se reflete nas variações das frações granulométricas passante. A areia varia entre 66% e 96%, o silte varia entre 28% e 80% enquanto a argila varia entre 12% e 63%, dependendo do local de coleta da amostra.

Ao analisar as curvas obtidas no interior do ponde é possível identificar que a estrutura de contenção cumpre o seu principal propósito de conter partículas sólidas maiores, demonstrado pela forma das amostras de entrada e de saída do ponde, nas quais identifica-se uma redução na frequência de frações mais grosseiras, no qual a fração areia (2,0mm) reduziu o retido de 32% na entrada para 0% na saída da estrutura. Já a fração fina (argila 0,005mm) teve um aumento na frequência elevando o retido de 15% na entrada do ponde para 64% na saída (Figura 51).

Figura 51-Curvas granulométricas das amostras coletadas no interior do ponde.



Fonte: autoria própria

Ao analisar a variação temporal das amostras temos um aporte de material mais grosseiro nas amostras de entrada, fato provavelmente relacionado as ações de adequações de drenagens da pilha, mais efetivas no ano de 2022, que nos anos anteriores. O efeito desse aporte no material de saída (AG-PDE-01-21 e AG-PDE-01-22) não foi perceptível. No entanto, é possível identificar uma redução na frequência das granulometrias entre 0,014mm e 0,059mm denotando

a uma redução de silte e areia fina do material em função da presença das cortinas entre outubro de 2021 e março de 2022.

5.1.2. Análise da estabilidade interna do solo

Para a realização da análise da estabilidade interna do solo pelo critério de Kenney e Lau (1985), torna-se necessária a definição do coeficiente de uniformidade (CU) e de curvatura (CC) das amostras.

O coeficiente de uniformidade (CU) é um parâmetro utilizado para caracterizar a distribuição granulométrica. Esse coeficiente caracteriza a distribuição do tamanho das partículas existentes dentro da amostra, fornecendo informações sobre a homogeneidade de diâmetros da amostra. É definido como a relação entre a abertura da peneira que permite a passagem de 60% (D60) do material poroso e a abertura da peneira que permite a passagem de 10% (D10) do mesmo material. valores próximos de um indicam que a curva granulométrica é quase vertical, ou seja, apresentam os diâmetros das partículas variando em um intervalo pequeno. No entanto, valores maiores de coeficiente de uniformidade são obtidos à medida que a curva granulométrica se abate, aumentando assim o intervalo de variação dos diâmetros (TONIN, 2015).

- Cu < 5: Solos uniformes;
- Cu entre 5 e 15: Solos medianamente uniformes;
- Cu > 15: Solos não uniformes.

As amostras caracterizadas no presente projeto, apresentaram comportamento de solos distintos. Enquanto as amostras situadas na saída do ponde apresentaram Cu de 4,9 que caracteriza um solo uniforma as amostras de entrada da estrutura e situadas no interior da pilha de estéril foram caracterizadas como não uniformes variando o Cu entre 40,35 à 559,11, com exceção da amostra PDE-123B, que foi caracterizada como uniforme com Cu de 2,45 (Tabela 18).

Tabela 18-Coeficiente de uniformidade (Cu) das amostras coletadas.

Amostra	Unidade geotécnica	Local	Cu	Classificação
AG-PDE-01-21	Material sedimentado	No final da estrutura de contenção, próximo ao vertedouro	4,9	Solo Uniforme
AG-PDE-01-22			4,9	Solo Uniforme
AG-PDE-02-21		Início da estrutura de contenção no emboque do canal periférico norte	559,11	Solo não uniforme
AG-PDE-02-22			559,11	Solo não uniforme
AG-PDE-03-21		Porção intermediária da estrutura de contenção no emboque do canal periférico sul	391,38	Solo não uniforme
AG-PDE-03-22			232,96	Solo não uniforme
AG-PDE-04-21	Estéril compactado	Canal de drenagem escavado	559,11	Solo não uniforme
AG-PDE-05-21	Estéril recém basculado	Praça de deposição, sem espalhamento ou compactação	391,38	Solo não uniforme
PDE-122	Estéril compactado	Amostras históricas localizadas no topo do depósito e coletadas à 1m de profundidade para avaliação a evolução de compactação do estéril.	40,35	Solo não uniforme
PDE-123B			2,45	Solo Uniforme
PDE-124A			69,89	Solo não uniforme
SPDE-121			159,78	Solo não uniforme

Fonte: autoria própria

O Coeficiente de Curvatura (Cc) mede a graduação do solo com base nos diâmetros D_{30}, D_{60} e D_{10} dado pela fórmula a seguir:

$$Cc = \frac{D^2{}_{30}}{D_{60}.D_{10}} \qquad \text{Equação [11]}$$

Onde:

- Cc é o coeficiente de curvatura
- $D^2{}_{30}$ valor do diâmetro no qual 30% da amostra é passante ao quadrado
- D_{60} diâmetro no qual 60% da amostra é passante
- D_{10} diâmetro no qual 10% da amostra é passante

Se o solo apresenta a maioria dos grãos do mesmo tamanho irá apresentar um Cc>3 e será considerado um solo mal graduado. No entanto, caso do solo apresente uma distribuição granulométrica em uma faixa ampla, apresentará valores de Cc variando entre 1 e 3, sendo considerado um solo bem graduado (PINTO, 2000).

Dentre as amostras analisadas, Tabela 19, apenas a amostra AG-PDE-05-21 apresentou comportamento de solo bem graduado, os demais solos ou apresentaram classificação de solo

mal graduado ou não puderam ser classificados por apresentarem valores calculados de Cc inferior a 1, em função das granulometrias restritas e muitas partículas finas.

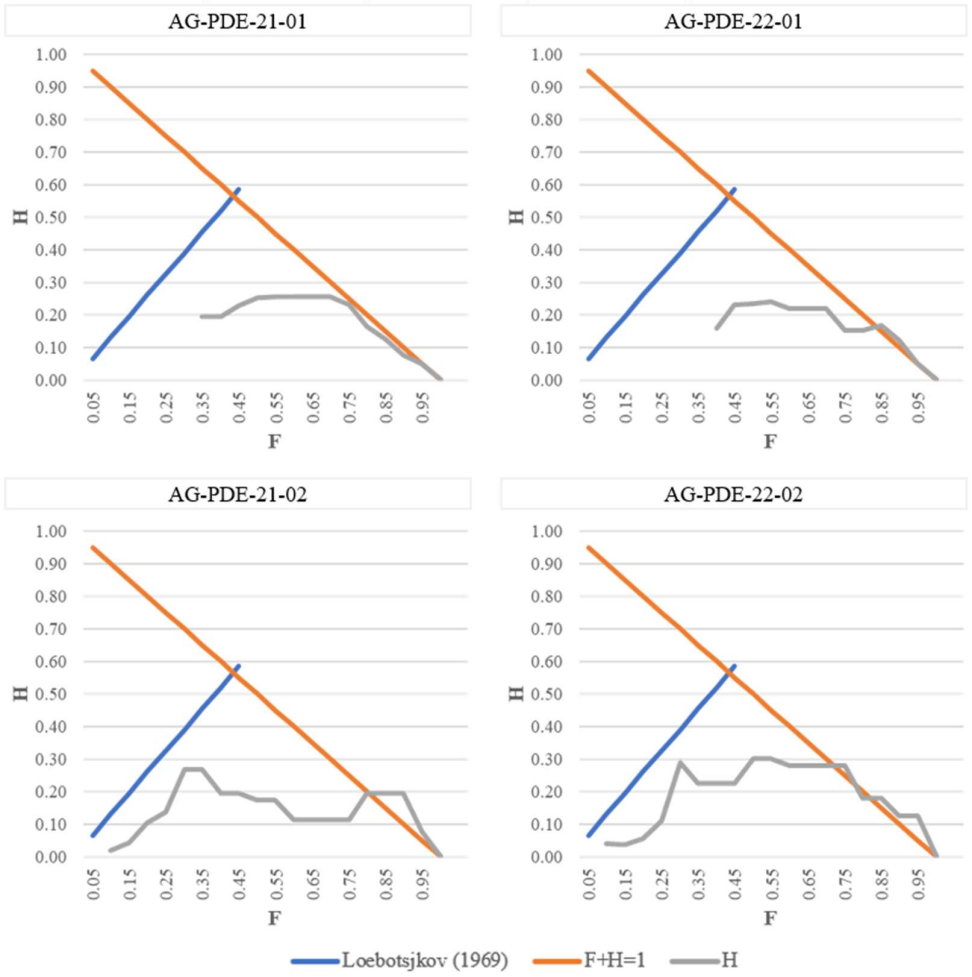
Tabela 19-Coeficiente de curvatura (Cc) das amostras coletadas.

Amostra	Unidade geotécnica	Local	Cc	Classificação
AG-PDE-01-21	Material sedimentado	No final da estrutura de contenção, próximo ao vertedouro	0,2	Não classificado
AG-PDE-01-22			0,2	Não classificado
AG-PDE-02-21		Início da estrutura de contenção no emboque do canal periférico norte	34,94	Mal Graduado
AG-PDE-02-22			34,94	Mal Graduado
AG-PDE-03-21		Porção intermediária da estrutura de contenção no emboque do canal periférico sul	12,48	Mal Graduado
AG-PDE-03-22			20,97	Mal Graduado
AG-PDE-04-21	Estéril compactado	Canal de drenagem escavado	0,04	Não classificado
AG-PDE-05-21	Estéril tombado	Praça de deposição, sem espalhamento ou compactação	1,96	Bem Graduado
PDE-122	Estéril compactado	Amostras históricas localizadas no topo do depósito e coletadas à 1m de profundidade para avaliação a evolução de compactação do estéril.	0,4	Não classificado
PDE-123B			0,41	Não classificado
PDE-124A			0,34	Não classificado
SPDE-121			5,09	Mal Graduado

Fonte: autoria própria

Ao analisar as curvas granulométricas do solo no local das cortinas (Figura 52), pelo método proposto por Kenney e Lau (1985) obtemos a classificação de solos internamente instáveis.

Figura 52-Curvas granulométricas plotadas no diagrama HxF



Fonte: Autoria própria.

O critério de Chen *et al.* (1981) *apud* Aguiar e Vertematti (2015), afirma que é possível analisar se um solo é autoestável (ou autofiltrante) no qual as partículas mais grossas do solo retêm as partículas menores, se forem atendidas as razões a seguir:

$$D_{50_S} > \frac{D_{85_S}}{5};\ D_{35_S} > \frac{D_{50_S}}{5};\ D_{15_S} > \frac{D_{35_S}}{5} \qquad \text{Equação [12]}$$

Onde:

- D_{15} diâmetro no qual 15% da amostra é passante
- D_{35} diâmetro no qual 35% da amostra é passante
- D_{50} diâmetro no qual 50% da amostra é passante
- D_{80} diâmetro no qual 80% da amostra é passante;

Similar ao método anterior os dados do solo foram classificados como um solo instável internamente (Tabela 20).

Tabela 20-Validação do critério de Chen et al. para as amostras selecionadas.

Amostra	D50s>D85s/5	D35s>D50s/5	D15s>D35s/5
AG-PDE-01-21	FALSO	VERDADEIRO	VERDADEIRO
AG-PDE-01-22	FALSO	VERDADEIRO	VERDADEIRO
AG-PDE-02-21	FALSO	VERDADEIRO	FALSO
AG-PDE-02-22	VERDADEIRO	VERDADEIRO	FALSO
AG-PDE-03-21	FALSO	VERDADEIRO	FALSO
AG-PDE-03-22	VERDADEIRO	VERDADEIRO	FALSO
AG-PDE-04-21	FALSO	FALSO	FALSO
AG-PDE-05-21	FALSO	VERDADEIRO	FALSO
PDE-122	FALSO	FALSO	FALSO
PDE-123B	FALSO	VERDADEIRO	VERDADEIRO
PDE-124A	FALSO	VERDADEIRO	FALSO
SPDE-121	FALSO	VERDADEIRO	FALSO

Nota: D_{15} diâmetro no qual 15% da amostra é passante; D_{35} diâmetro no qual 35% da amostra é passante; D_{50} diâmetro no qual 50% da amostra é passante; D_{80} diâmetro no qual 80% da amostra é passante;

O comportamento das amostras sugere que o solo a ser filtrado pelas cortinas de turbidez apresenta comportamento instável, susceptível ao processo de sufusão dado pela passagem do particulado fino por entre a matriz filtrante.

5.1.3. Análise de turbidez

Os primeiros dados coletados na pesquisa são dispostos na Tabela 21, que mostra os dados de turbidez coletados no ponde entre outubro de 2021 e abril de 2022. A localização dos pontos amostrais é dada na Figura 34 seguindo o fluxograma amostral da Figura 47.

Tabela 21-Dados de turbidez coletados no ponde entre outubro de 2021 e abril de 2022.

Data	Montante das cortinas (A)	Entre as cortinas (B)	Jusante das cortinas (C)	Estrutura Vertendo	Eficiência no ponto (b)	Eficiência no ponto (c)
26/10/2021	3804	153	297	Sim	95.98%	92.19%
28/10/2021	605	581	237	Não	3.97%	60.83%
01/11/2021	469	341	319	Não	27.29%	31.98%
08/11/2021	521.35	458.24		Não	12.11%	
11/11/2021	259.42	264.52	228.95	Não	-1.97%	11.75%
12/11/2021	56.14	41.5	45.21	Não	26.08%	19.47%
19/11/2021	89.57		85.62	Não		4.41%
26/11/2021	206.83	233.21	245.59	Não	-12.75%	-18.74%
01/12/2021	367.14	358.79	358.7	Não	2.27%	2.30%
03/12/2021	371.13	410.37	353.81	Não	-10.57%	4.67%
07/12/2021	355.25	348.89	351.4	Não	1.79%	1.08%
17/12/2021	550.09	550.9	532.72	Não	-0.15%	3.16%
20/12/2021	850.72	826.74	794.25	Não	2.82%	6.64%
21/12/2021	794.19	788.32	756.83	Não	0.74%	4.70%
29/12/2021	693.09	672.56	669.23	Não	2.96%	3.44%
03/01/2022	863.18	857.63	819.65	Sim	0.64%	5.04%
06/01/2022	975.68	981.36	924.22	Sim	-0.58%	5.27%
07/01/2022	1073.72	1070.76	1015.64	Sim	0.28%	5.41%
10/01/2022	772.63	765.83	759.56	Sim	0.88%	1.69%
24/01/2022	42.01	58.76	89.28	Não	-39.87%	-112.52%
26/01/2022	95.08	98.13	77.47	Não	-3.21%	18.52%
07/02/2022	780.87	820.94	803.9	Sim	-5.13%	-2.95%
10/02/2022	575.09		534.61	Sim		7.04%
14/02/2022	720.54	711.01	704.72	Não	1.32%	2.20%
21/02/2022	499.68	485.97	458.81	Não	2.74%	8.18%
25/02/2022	454.77	460.21	416.14	Não	-1.20%	8.49%
03/03/2022	312.88	337.35	333.39	Não	-7.82%	-6.56%
07/03/2022	400.06	411.3	405.91	Não	-2.81%	-1.46%
11/03/2022	364.88	358.18	356.88	Não	1.84%	2.19%
12/03/2022	315.86	312.92	316.19	Não	0.93%	-0.10%
14/03/2022	294.97	293.64	291.06	Não	0.45%	1.33%
17/03/2022	322.36	323.06	329.09	Não	-0.22%	-2.09%
21/03/2022	220.88	227.81	206.67	Não	-3.14%	6.43%
28/03/2022	106.72	92.58	95.67	Não	13.25%	10.35%
01/04/2022	58.96	62.21	62.67	Não	-5.51%	-6.29%
13/04/2022	520.95	545.82	542.67	Não	-4.77%	-4.17%

Fonte: Dados coletados em campo

Como a cortina foi instalada apenas em 23 de outubro de 2021 as análises anteriores a essa data não dispõem de coletas nos pontos A e B. Outras falhas de monitoramento também são identificadas e estão relacionadas a falhas na coleta da amostra, nas quais o amostrador

perturbou a margem da estrutura, elevando a turbidez momentaneamente impedindo a coleta da amostra.

As análises de turbidez dentro do ponde apresentaram valores variando de 41,5 a 3804NTU (a montante das duas cortinas) apresentando a maior eficiência na primeira medida. Em 26/10/21 a chuva torrencial gerou fluxo de sedimentos a montante das cortinas. Após a atuação da estrutura são perceptíveis em campo o fluxo em duas fases, sendo a mais profunda composta por um fluxo de turbidez, sobreposto por uma massa de água clarificada.

Ao obter os primeiros dados a cortina demonstrou eficiência acima do esperado para as condições de projeto, fechando o primeiro mês de experimento com eficiência de 92.19% com a estrutura vertendo (ambiente lótico de fluxo constante) e 60.83% com a estrutura em condição de ambiente lêntico, sem avarias face a chuvas torrenciais. Nos meses subsequentes foi evidenciado uma redução significativa da eficiência das cortinas, culminando na homogeneização do fluido contido no ponde. Ao término do primeiro período de chuvas foram obtidas eficiências médias de 3,58% com o ponde vertendo e 3,19% com o ponde não vertendo

Gradativamente as duas fases foram homogeneizadas, elevando a turbidez do material sobrenadante e reduzindo a eficiência das cortinas. Nos primeiros 30 dias de experimento é possível identificar uma redução significativa da eficiência das cortinas. Um ponto de destaque nessa redução é a ausência de vertimento da estrutura, desde o dia 27/10.

A redução da eficiência pode ser abrangida com base nos seguintes fatores: A geometria de instalação adotada, em função do baixo conhecimento do regime hídrico e ausência na literatura de referência de experimentos similares, não seria recomendada para a situação do experimento. As chuvas pontuais promovem picos de vazão forçando cargas nas cortinas que podem afetar a integridade do sistema. No entanto, entre as chuvas ocorrem período curtos de estiagem, nos quais o ponde deixa de verter, alterando o regime hídrico de lótico com alta energia, para lêntico de baixa energia. Nesses momentos de baixa energia o fluxo hídrico, até então regido essencialmente pela gravidade, passa a ter o vento e a temperatura como fatores que regem a direção do fluxo hídrico no ponde, chegando ao ponto de inverter o fluxo dentro da estrutura.

Nesses momentos de baixa energia o fluxo hídrico, até então regido essencialmente pela gravidade, passa a ter o vento e a temperatura como fatores que regem a direção do fluxo hídrico no ponde, chegando ao ponto de inverter o fluxo dentro da estrutura. A alteração no fluxo,

associado à geometria aberta das cortinas, favorece o processo de homogeneização do fluido residual no ponde, degradando a eficiência das cortinas.

Ações complementares foram adotadas com o objetivo de melhorar a turbidez do efluente de saída do ponde como a instalação de uma cortina de controle de sedimentos (*silt fence*) na entrada do extravasor do ponde. No entanto, a *silt fence* sofreu falha estrutural, vindo a romper sem que houvesse ganhos significativos ao projeto.

Ao longo do período de seca, de abril a setembro de 2022, as cortinas ficaram emersas a medida que o nível da água no ponde reduzia (Figura 53). Assim que foi possível a retirada das cortinas, em agosto de 2022, estas foram dispostas no extravasor do ponde para limpeza com auxílio de um caminhão pipa.

Figura 53-Cortinas emersas ao fluido, durante a descida do nível da água no ponde (maio de 2021).



Fonte: acervo pessoal

Figura 54-Cortinas dispostas no extravasor para limpeza.



Fonte: acervo pessoal

Após limpeza as cortinas retornaram para o ponde sendo dispostas conjuntas, numa única seção de cortina, com configuração em "U" diferente da aplicada no ano anterior, visando minimizar os impactos da mudança de fluxo, dividindo o ponde em duas porções, uma vez que essa geometria tem registro bibliográficos de maior eficiência (FRANCINGUES; THOMPSON, 2006; JOHANSON, 1978; NYSDOT, 2018).

Essa configuração elimina a necessidade de coleta no ponto "B", entre as cortinas, sendo adotado o fluxograma de coleta exposto na Figura 48,gerando os dados dispostos na Tabela 22. Em função do atraso no início das chuvas e condições de segurança, foram coletados dados num período limitado entre novembro de 2022 e fevereiro de 2023.

Tabela 22-Dados de turbidez coletados no ponde entre novembro de 2022 e fevereiro de 2023.

Data	Montante das cortinas (A)	Montante das cortinas (A)	Montante das cortinas (A)	Eficiência no ponto (c)
23/11/2022	160	110,43	Não	31%
29/11/2022	206,71	320	Não	-55%
05/12/2022	291,02	320,01	Não	-10%
07/12/2022	225,09	212,66	Não	6%
09/12/2022	74,45	182,61	Não	-145%
14/12/2022	40		Não	
16/12/2022	80,34	72,46	Não	10%
19/12/2022	58,62	76,97	Não	-31%
20/12/2022	133,97	73,05	Sim	45%
26/12/2022	377,8	254,31	Sim	33%
27/12/2022	357,02	251,69	Sim	30%
28/12/2022	265,88	218,16	Sim	18%
29/12/2022	250,59	244,31	Sim	3%
04/01/2023	353,41	233,69	Sim	34%
05/01/2023	434,59	353,76	Sim	19%
06/01/2023	548	515,55	Sim	6%
07/01/2023		432	Sim	
08/01/2023		619	Sim	
09/01/2023	398,05	429,05	Não	-8%
10/01/2023	258,28	282,86	Não	-10%
12/01/2023	273,91	217,53	Sim	21%
14/01/2023		637	Sim	
15/01/2023		506	Não	
16/01/2023	308,64	257,91	Não	16%
20/01/2023		329,42	Sim	
21/01/2023		613	Não	
22/01/2023		505	Não	
23/01/2023	254,47	248,73	Sim	2%
24/01/2023	215,89	209,75	Sim	3%
26/01/2023	158,08	156,57	Não	1%
27/01/2023	248,19	187,81	Não	24%
28/01/2023		443	Sim	
29/01/2023		312	Não	
31/01/2023	126,59	88,18	Não	30%
04/02/2023		13,44	Não	
05/02/2023		12,81	Não	
11/02/2023		14,25	Não	
12/02/2023		11,11	Não	

Fonte: Dados coletados em campo

Nas primeiras análises dos dados é possível identificar uma eficiência negativa, uma vez que a estrutura estava em processo de enchimento. Como as chuvas no período 2022-2023, foram mais espaçadas e com menor intensidade nos meses de outubro e novembro o ponde

somente veio a extravasar em dezembro de 2022, quando as cortinas passaram a apresentam eficiência positiva. Mais uma vez o regime de fluxo atua como fator dominante no condicionamento da eficiência das cortinas.

Ao término do período de chuvas 2022-2023 é possível identificar que a eficiência das cortinas durante o regime lótico com o ponde vertendo é de 19,29%, sendo que para o regime lêntico a eficiência é praticamente nula com 0,43%, apresentando momentos com eficiência negativa.

As cortinas não sofreram danos ao longo da pesquisa, mantendo-se integras e sem avarias, com resistência a tração ainda superior ao requisito de catálogo. No entanto, a exposição direta ao sol promoveu degradação com relação a resistência da cortina e pode afetar a sua aplicação em obras futuras.

5.1.4. Parâmetros físico-químicos

Em conjunto com os dados de turbidez, foram coletados com auxílio da sonda multiparâmetro a temperatura da água, oxigênio dissolvido (OD) e saturação de oxigênio dissolvido (OD%), condutividade elétrica, sólidos totais dissolvidos (TDS), pH e potencial redox (ORP), estando todos os dados coletados disponíveis no anexo I (Tabela 23-Resumo dos parâmetros físico-químicos coletados).

Tabela 23-Resumo dos parâmetros físico-químicos coletados

Estatística	Temp. (ºC)	Oxigênio dissolvido %	Oxigênio Dissolvido (mg/L)	Condutividade (µS/cm)	Sólidos dissolvidos (mg/L)	pH	Potencial redox (mV)
Média	24.66	84%	6.98	24.92	16.51	7.94	147.82
Max	34.80	106%	8.26	62.00	37.00	13.94	799.21
Min	20.50	62%	6.00	3.40	1.00	5.36	-13.90
Desvio padrão	2.97	5%	0.29	11.56	7.53	1.64	95.51

Fonte: Dados coletados em campo

A temperatura da água armazenada no ponde sofre grande variação para parâmetros hídricos, havendo registros de 20,5ºC à 34,8ºC. Tal variação se dá principalmente quando a estrutura se encontra em regime lêntico em dias de sol.

O oxigênio dissolvido (OD) é um fator essencial para manutenção da vida aquática e sua concentração varia de acordo com a pressão atmosférica (altitude) e com a temperatura do meio. Como esse parâmetro é um fator importante no processo de autodepuração em sistemas aquáticos naturais e estações de tratamento de esgotos, o seu acompanhamento permite avaliar a deterioração do corpo hídrico, uma vez que durante a degradação da matéria orgânica, as

bactérias fazem uso do oxigênio nos seus processos respiratórios, podendo vir a causar uma redução de sua concentração no meio. De acordo com a Conama Nº357/2005 o valor mínimo de oxigênio dissolvido e córregos classe II é de 5,0mg/l, valor abaixo do registrado no ponde.

O multiparâmetro mensura também a saturação de oxigênio na água (OD%). Entende-se 100% de saturação de oxigênio a quantidade máxima de oxigênio que pode ser dissolvida na água em determinada pressão, temperatura e salinidade. Sendo identificados valores entre 62% e 106%. Os valores de OD acima de 100% de saturação podem ocorrer em águas naturais durante alguns períodos do dia, nos quais ocorre alta taxa de fotossíntese (FIORUCCI; FILHO, 2005).

A condutividade é a capacidade da água de conduzir uma corrente elétrica e depende da temperatura e da concentração dos íons presentes na solução. O parâmetro de condutividade é então usado empiricamente para determinação de sólidos totais dissolvidos (*total dissolved solids*, TDS) em mg/L, ambos os dados são fornecidos pelo multiparâmetro YSI. A condutividade mensurada variou entre 3,4 µS/cm à 62,00 µS/cm.

O pH representa o percentual hidrogeniônico e é utilizado como uma escala ou medida para classificar a solução como ácida, neutra ou alcalina. Os dados coletados variam entre 5,36 e 13.94, demonstrando a presença de uma água neutra a básica.

O potencial redox ou ORP (*oxidation reduction potential*) é utilizado para avaliar a capacidade de doar ou aceitar elétrons numa determinada solução. Um potencial redox positivo indica a capacidade de aceitar elétrons (ou seja, é um agente oxidante, oxidante), e um potencial redox negativo indica a capacidade de doar elétrons nessas condições (ou seja, é um agente redutor, redutor). No interior do ponde o ORP variou entre -13.99mV e 799.21mV, caracterizando o ambiente com predominância oxidante.

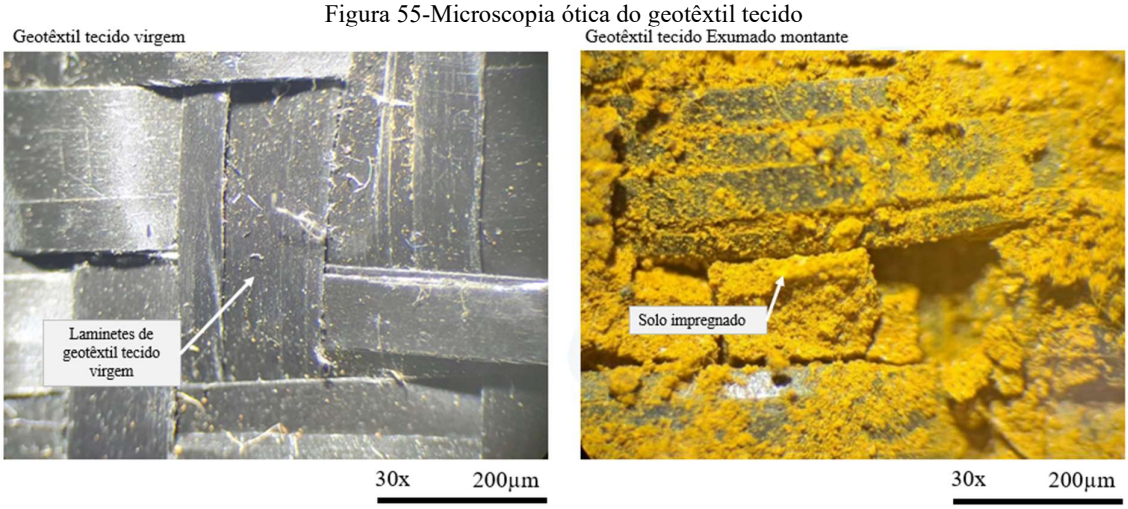
Apesar de ser identificada variação nos parâmetros físico-químicos não houve, durante a presente pesquisa uma correlação entre os parâmetros levantados e a eficiência das cortinas de turbidez.

5.1.5. Resultados da análise por microscopia ótica e eletrônica de varredura

Foram coletadas amostras de geotêxtil tecido utilizado na cortina de turbidez e de geotêxtil não tecido utilizado na cortina de controle de sedimentos de forma aleatória para identificação de processos de colmatação após secagem das amostras.

Na Figura 55 (a) é possível ver na imagem esquerda a amostra GTX-W-I de geotêxtil tecido virgem com os detalhes dos laminetes PP ultra-estabilizado com anti-UV, na imagem direita (Figura 55 b)a amostra GTX-W-II apresenta o geotêxtil com impregnação de argilominerais e grumos de solo nos laminetes e nos poros do tecido.

Figura 55-Microscopia ótica do geotêxtil tecido



Fonte: Acervo Pessoal

Para realização da análise de microscopia eletrônica de varredura foram adotadas amostras selecionadas dentre as expostas na Tabela 16 (página 95), descritas na Tabela 24 a seguir:

Tabela 24-Amostras de MEV selecionadas para avaliação.

Amostra	Geotêxtil	Descrição
M2300750	PP 105/105 DW	4 - Geotêxtil tecido virgem
M2300751	PP 105/105 DW	5A – Geotêxtil cortina impregnado c/solo + Fluxo direto Face montante
M2300753	PP 105/105 DW	6A - Geotêxtil cortina impregnado c/solo Face Jusante Fluxo passante
M2300755	PP 105/105 DW	7A - Geotêxtil impregnado c/solo – amostra após limpeza (Fator Redução) +Fluxo direto Face montante
M2300757	PP 105/105 DW	8A - Geotêxtil impregnado c/solo – amostra após limpeza (Fator Redução) Face Jusante
M2300759	PP 105/105 DW	9A - Geotêxtil Tecido Amostra exposta ao sol Face exposta ao sol

Fonte: Autoria própria.

As imagens expostas na Figura 56, apresentam um comparativo entre as amostras do geotêxtil tecido virgem (a) sem alterações nos laminetes, com os geotêxteis tecido exumados da obra, sendo possível identificar uma impregnação proeminente na face a montante (b) e em

menor proporção na face jusante (c). Na face a jusante (c) também é possível identificar danos aos laminetes causados pela exposição da cortina em condição de obra.

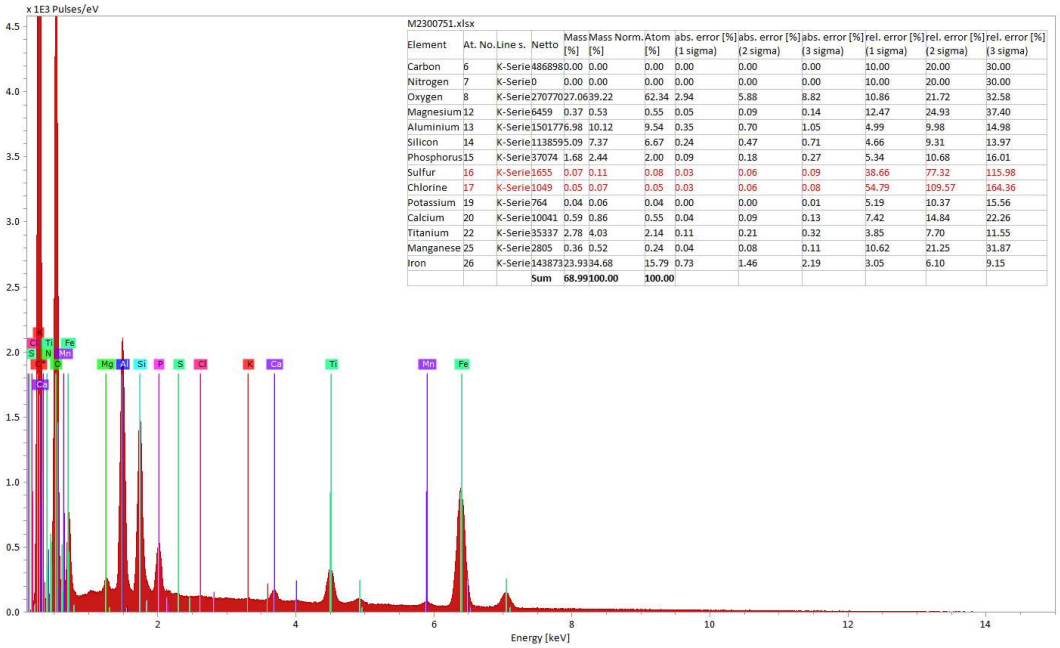
Figura 56-MEV do geotêxtil tecido da cortina de turbidez virgem e exumada



(a) Geotêxtil tecido virgem; (b) Geotêxtil tecido exumado impregnado com solo na face montante; (c) Geotêxtil tecido exumado impregnado com solo com fluxo passante.
Fonte: Autoria própria

A partir das interações entre o material encrustado e o feixe de elétrons da microscopia eletrônica de varredura é possível identificar a presença de alguns elementos e comparar com os valores esperados para o solo analisado (Figura 57). Os elementos identificados, em ordem decrescente, foram oxigênio, alumínio, sílica, titânio e fósforo. O oxigênio, o alumínio e a sílica estão relacionados aos argilominerais, em sua maioria aluminossilicatos presentes no solo, enquanto o titânio está relacionado a peroviskita, e o fósforo está relacionada a fosfatos secundários, ambos presentes no estéril.

Figura 57-Análise de elementos pela microscopia eletrônica de varredura.



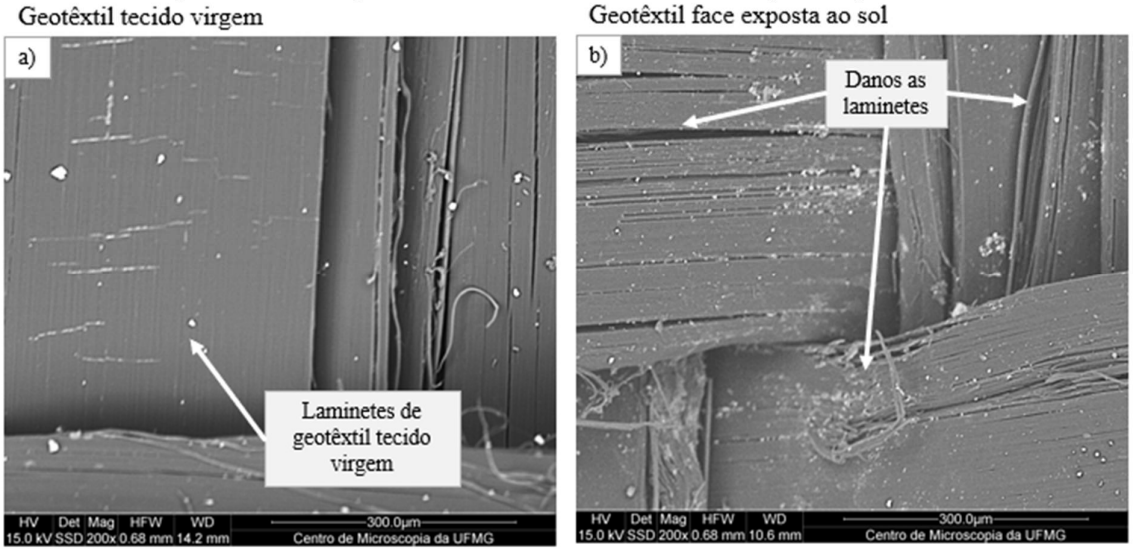
Element	At. No.	Line s.	Netto	Mass [%]	Mass Norm. [%]	Atom [%]	abs. error [%] (1 sigma)	abs. error [%] (2 sigma)	abs. error [%] (3 sigma)	rel. error [%] (1 sigma)	rel. error [%] (2 sigma)	rel. error [%] (3 sigma)
Carbon	6	K-Serie	486898	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	10.00	20.00	30.00
Nitrogen	7	K-Serie	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	10.00	20.00	30.00
Oxygen	8	K-Serie	270770	27.06	39.22	62.34	2.94	5.88	8.82	10.86	21.72	32.58
Magnesium	12	K-Serie	6459	0.37	0.53	0.55	0.05	0.09	0.14	12.47	24.93	37.40
Aluminium	13	K-Serie	150177	6.98	10.12	9.54	0.35	0.70	1.05	4.99	9.98	14.98
Silicon	14	K-Serie	113859	5.09	7.37	6.67	0.24	0.47	0.71	4.66	9.31	13.97
Phosphorus	15	K-Serie	37074	1.68	2.44	2.00	0.09	0.18	0.27	5.34	10.68	16.01
Sulfur	16	K-Serie	1655	0.07	0.11	0.08	0.03	0.06	0.09	38.66	77.32	115.98
Chlorine	17	K-Serie	1049	0.05	0.07	0.05	0.03	0.06	0.08	54.79	109.57	164.36
Potassium	19	K-Serie	764	0.04	0.06	0.04	0.00	0.00	0.01	5.19	10.37	15.56
Calcium	20	K-Serie	10041	0.59	0.86	0.55	0.04	0.09	0.13	7.42	14.84	22.26
Titanium	22	K-Serie	35337	2.78	4.03	2.14	0.11	0.21	0.32	3.85	7.70	11.55
Manganese	25	K-Serie	2805	0.36	0.52	0.24	0.04	0.08	0.11	10.62	21.25	31.87
Iron	26	K-Serie	143873	23.93	34.68	15.79	0.73	1.46	2.19	3.05	6.10	9.15
		Sum		68.99	100.00	100.00						

Fonte: Autoria própria.

A análise identificou anomalias no espectro do enxofre e do cloro, no entanto com erro analítico muito alto, não sendo possível afirmar a presença de ambos os elementos. Se comparado com a geologia local é esperado um valor residual de cloro, proporcional ao flúor e ao fósforo no minério, em função do mineral-minério cloro-flúor-apatita. A presença desse íon no estéril não é esperada, principalmente em concentração tão elevada, o que explica o erro analítico. O enxofre por sua vez, não apresenta relato de minerais no complexo que o contenham em sua composição.

Através da microscopia eletrônica de varredura (MEV) também foi possível avaliar os danos causados a amostra exposta ao sol, Na Figura 58 é possível identificar a degradação do geotêxtil tecido exposto ao sol, através dos danos evidenciados no geotêxtil tecido.

Figura 58-MEV do geotêxtil tecido da cortina de turbidez virgem e exposta ao sol.

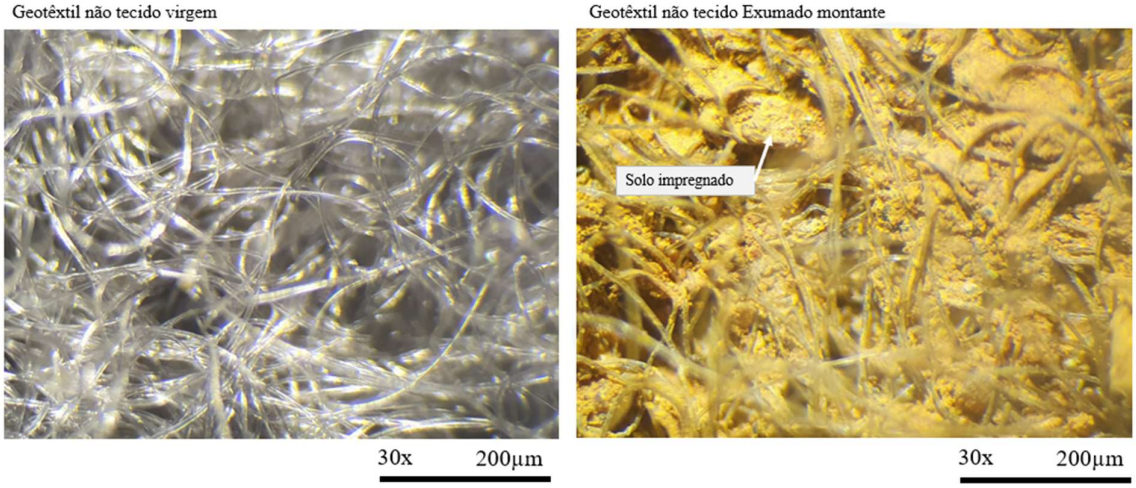


(a) Geotêxtil tecido virgem; (b) Geotêxtil tecido exposto ao sol
Fonte: Autoria própria

O geotêxtil não tecido teve sua análise realizada por microscopia óptica comparando a amostra de geotêxtil virgem com o geotêxtil impregnada, que por sua vez, foi disponibilizado para análise após falha da cortina de controle de sedimento.

Ao comparar com a amostra virgem com a amostra exumada (Figura 59) é possível identificar o mecanismo de colmatação por cegamento em estágio avançado, colmatando o geotêxtil com argilominerais.

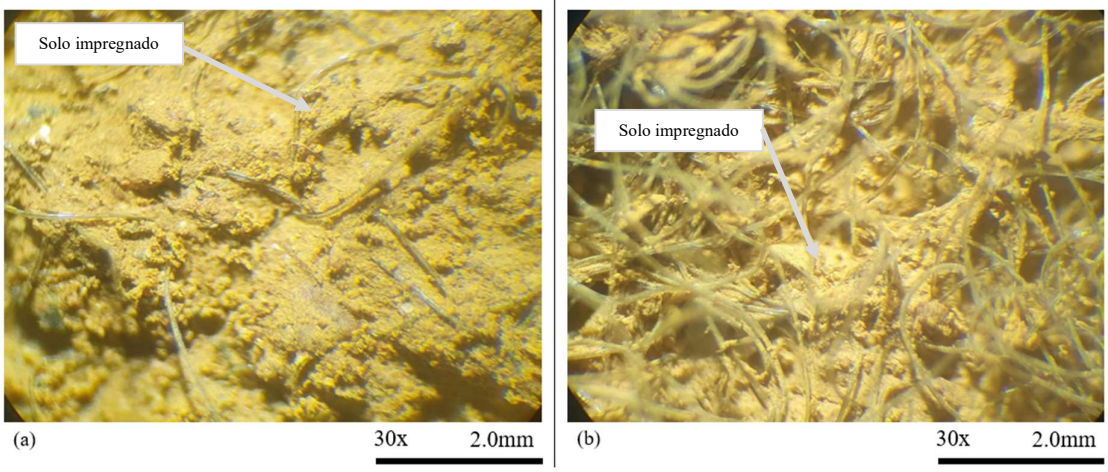
Figura 59-Comparativo do geotêxtil não tecido virgem com o impregnado por sedimentos do ponde na cortina de controle de turbidez.



a) Imagem do geotêxtil não tecido virgem GTX-NW-I; b) Imagem do lado a montante amostra GTX-NW-II
Fonte: Acervo Pessoal

Na Figura 60 é possível identificar a variação entre a colmatação a montante (a) e a jusante (b). Em alguns pontos a montante (a) identifica-se a formação de uma torta com acúmulo de partículas de solo com dimensões menores que as aberturas do filtro sobre sua superfície.

Figura 60-Comparativo da impregnação a montante com jusante do geotêxtil não tecido.



a) Imagem do lado a montante da amostra GTX-NW-II; b) Imagem do lado a jusante amostra GTX-NW-II
Fonte: Acervo Pessoal

O mecanismo de cegamento identificado, ocorre pois o solo a ser filtrado é internamente instável e sujeito ao fenômeno de sufusão. A incompatibilidade entre o solo e o filtro acaba resultando na formação da camada de baixa permeabilidade sobre o filtro.

A amostra GTX-NW-II permitiu a análise de um corte transversal, onde foi possível identificar o mecanismo de bloqueamento na porção interna do geotêxtil Figura 61.

Figura 61-Colmatação interna do geotêxtil não tecido extraído da silt fence.



Fonte: Acervo Pessoal

Similar ao geotêxtil tecido, para realização da análise de microscopia eletrônica de varredura foram adotadas as amostras geotêxtis não tecido selecionadas dentre as disponíveis na Tabela 16 (página 95), sendo selecionadas as amostras listadas abaixo:

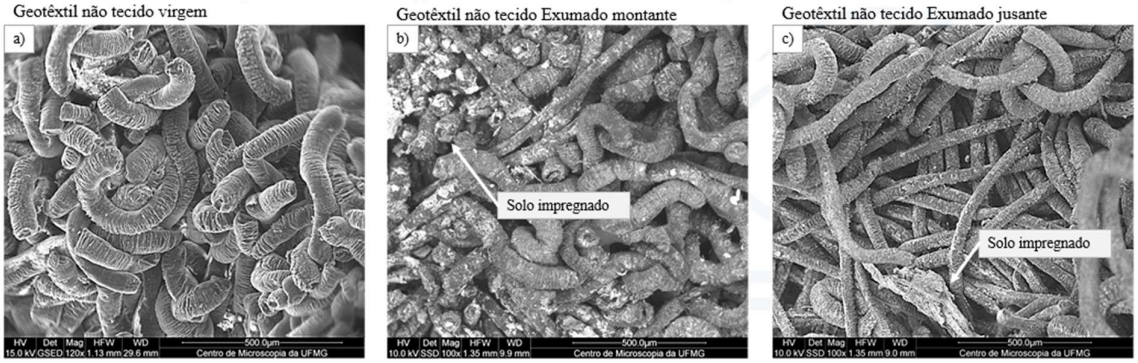
Tabela 25-Amostras de MEV selecionadas como comparativo.

Amostra	Geotêxtil	Descrição
M2300745	GF 26/500	1 – Geotextil não tecido - amostra virgem
M2300746	GF 26/500	2A – Geotêxtil não tecido impregnado c/solo + Fluido direto Face Montante

Fonte: Autoria própria.

As imagens expostas na Figura 62, permitem realizar um comparativo visual entre as amostras do Geotêxtil não tecido virgem GTX-NW-I, sem alterações nas fibras e sem a presença de particulado (a), com os geotêxteis impregnados aplicados em obra (b; c) GTX-NW-II, sendo possível identificar partículas finas, abaixo de 10µm impregnadas aos filamentos e colmatando as escamas causadas pela extrusão da fibra e grumos de solo na ordem de 400µm, preenchendo os poros do geotêxtil. Como a amostra foi exposta apenas ao fluxo unidirecional é possível identificar um volume maior de solo impregnado na faze a montante (b) se comparado ao volume de solo impregnado na face a jusante (c).

Figura 62-Microscopia eletrônica de varredura do geotêxtil não tecido



(a) Geotêxtil não tecido virgem; (b)geotêxtil não tecido colmatado por material particulado na face a montante;(c) Fibras do geotêxtil não tecido impregnado na face a jusante.
Fonte: Autoria própria

5.1.6. Fator de impregnação dos geotêxteis

O fator de impregnação é um parâmetro adimensional que relaciona a massa de material impregnado no geotêxtil com a massa da amostra limpa (Figura 63).

Figura 63-Pesagem da amostra GTX-NW-I para determinação de fator de impregnação



Fonte: Acervo Pessoal

Para identificação do fator de impregnação são utilizadas amostras do geotêxtil da saia da cortina de turbidez e utilizado na cortina de controle de sedimento expostas a condição de obra (Tabela 26).

Tabela 26-Fator de impregnação dos geotêxteis

Amostra	Área (cm²)	Peso colmatado (gr)	Peso geotêxtil limpo (gr)	Material impregnado (gr)	Impregnação por área (gr/cm²)	Fator de impregnação
GTX-NW-I	243,37	55,07	18,32	36,75	0,151	2,01
GTX-NW-II	237,15	52,68	17,8	34,88	0,147	1,96
GTX-NW-III	245,65	58,98	20,91	38,07	0,155	1,82
GTX-W-I	392,8	60,02	29,48	30,54	0,078	1,04
GTX-W-II	378	59,82	28,45	31,37	0,083	1,10
GTX-W-III	326,48	49,48	24,65	24,83	0,076	1,01

Nota: GTX-NW – Geotêxtil não tecido, GTX-W – Geotêxtil tecido
Fonte: Autoria própria

Foram coletadas 3 amostras do geotêxtil não tecido (GTX-NW) da cortina de controle de sedimentos, sendo mensurado sua massa antes e depois da limpeza da amostra. Chegando a um fator de impregnação de 1.82 à 2.01. Para o geotêxtil tecido (GTX-W) aplicado na cortina de turbidez, foram coletadas outras 3 amostras, obtendo um fator de impregnação de 1.01 à 1.10.

Ao correlacionar os fatores de impregnação obtidos com as análises de MEV temos que o geotêxtil não tecido aplicado na cortina de controle de sedimento, reteve mais particulado que o geotêxtil tecido aplicado na cortina. Essa variação já era esperada, uma vez que a cortina visa deter o particulado em suspensão no fluido do ponde, enquanto a silt fence retém o particulado inserido no fluxo de sedimentos.

5.1.7. Dados dos ensaios de tração

Nessa seção serão apresentados os resultados dos ensaios de tração realizados no laboratório de geotecnia da UFSCAR – Universidade Federal de São Carlos, nas amostras de geotêxtil tecido exumadas (cortina) e amostras expostas apenas a condições intempéricas, sem interação com o fluido do ponde (expostas ao sol), posteriormente comparadas com os valores de ensaios obtidos e fornecidos pelo fabricante do geotêxtil tecido.

Apesar de ter sido separada uma amostra de geotêxtil virgem para a realização dos ensaios em laboratório, essa amostra foi extraviada pela mineradora, impossibilitando o comparativo com o geotêxtil de mesmo lote. Após contato com a fabricante, foi possível obter dados de ensaio de tração dispostos no presente estudo.

Apesar da empresa fabricante apresentar valores de catálogo na ordem de 105kN/m os resultados dos ensaios fornecidos (Tabela 27 e Tabela 28) apresentam valores de resistência superiores, sendo 132,7kN/m no sentido longitudinal e 129,9kN/m no sentido transversal (Figura 64).

Tabela 27-Resultado de resistência a tração das amostras virgens do fabricante, sentido longitudinal.

Corpo de prova	Largura (mm)	Compr. Base (mm)	Força Max. (N)	Força/Larg (N/mm)	Deformação (mm)	Deformação específica (%)
Número CPs	5	5	5	5	5	5
Média	200	5230	2653,2	132,7	60,6	8,5
Desv. Padrão	0	0	39,6	2,0	1,2	0,3
Coef. Var. (%)	0	0	1,5	1,5	1,9	3,9
Mínimo	200	5230	2598,6	129,9	59,4	8,1
Máximo	200	5230	2707,0	135,4	60,8	8,9

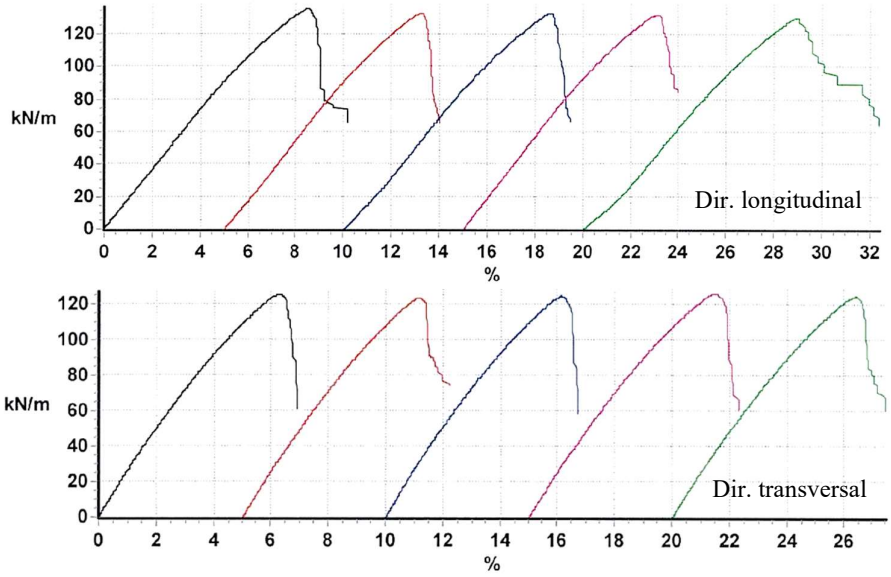
Fonte: Autoria própria.

Tabela 28-Resultado de resistência a tração das amostras virgens do fabricante, sentido transversal.

Corpo de prova	Largura (mm)	Compr. Base (mm)	Força Max. (N)	Força/Larg (N/mm)	Deformação (mm)	Deformação específica (%)
Número CPs	5	5	5	5	5	5
Média	200	5230	2498,3	124,9	60,3	6,3
Desv. Padrão	0	0	17,3	0,9	0,2	0,2
Coef. Var. (%)	0	0	0,7	0,7	0,3	3,3
Mínimo	200	5230	2472,0	123,6	60,2	6,1
Máximo	200	5230	2519,9	126,0	60,4	6,6

Fonte: Autoria própria.

Figura 64-Ensaio de tração longitudinal e transversal no geotêxtil PP105/105DW



Fonte: Laudo PR210185003 Huesker (2021)

A Tabela 29 e a Tabela 30 apresentam os valores obtidos no ensaio de tração de faixa estreita, apresentando uma resistência a tração média de 138N/mm, variando entre de 122,6N/mm e 151,8 N/mm.

Tabela 29-Resultado de resistência a tração de faixa estreita das amostras da cortina, sentido longitudinal.

Corpo de prova	Largura (mm)	Compr. Base (mm)	Força Max. (N)	Força/Larg (N/mm)	Deformação (mm)	Deformação específica (%)
Número CPs	10	10	10	10	10	10
Média	50	75	6915	138,3	14,170	18,890
Mediana	50	75	6872	137,4	14,230	18,980
Desv. Padrão	0	0	449,2	8,984	0,773	1,031
Coef. Var. (%)	0	0	6,496	6,496	5,457	5,457
Mínimo	50	75	6128	122,6	12,570	16,760
Máximo	50	75	7590	151,8	15,260	20,340

Fonte: autoria própria

Tabela 30-Resultado de resistência a tração de faixa estreita das amostras da cortina, sentido transversal.

Corpo de prova	Largura (mm)	Compr. Base (mm)	Força Max. (N)	Força/Larg (N/mm)	Deformação (mm)	Deformação específica (%)
Número CPs	10	10	10	10	10	10
Média	50	75	5901	118	6,225	8,299
Mediana	50	75	5920	118,4	6,217	8,290
Desv. Padrão	0	0	480,9	9,618	0,406	0,541
Coef. Var. (%)	0	0	8,149	8,149	6,524	6,524
Mínimo	50	75	5028	100,6	5,617	7,489
Máximo	50	75	6557	131,1	7,079	9,439

Fonte: Autoria própria.

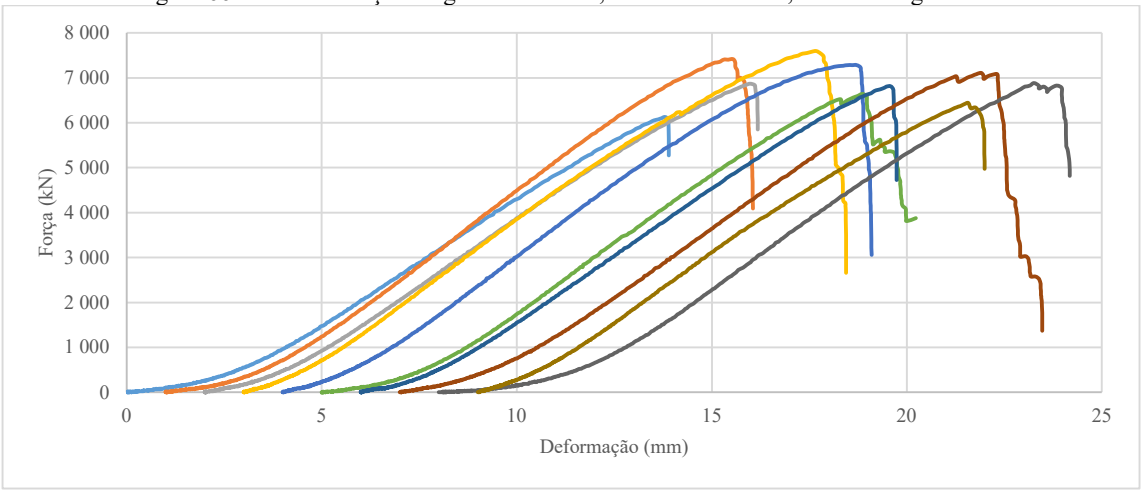
Na Figura 65 é possível identificar as amostras longitudinais da cortina rompidas após o ensaio de tração. Ao analisar os gráficos obtidos nos ensaios de tração das amostras exumadas (Figura 66 e Figura 67), é possível identificar geometria das curvas similares ao fornecido pelo fabricante.

Figura 65-Amostras de geotêxtil tecido exumadas, rompidas após ensaio de tração de faixa estreita.



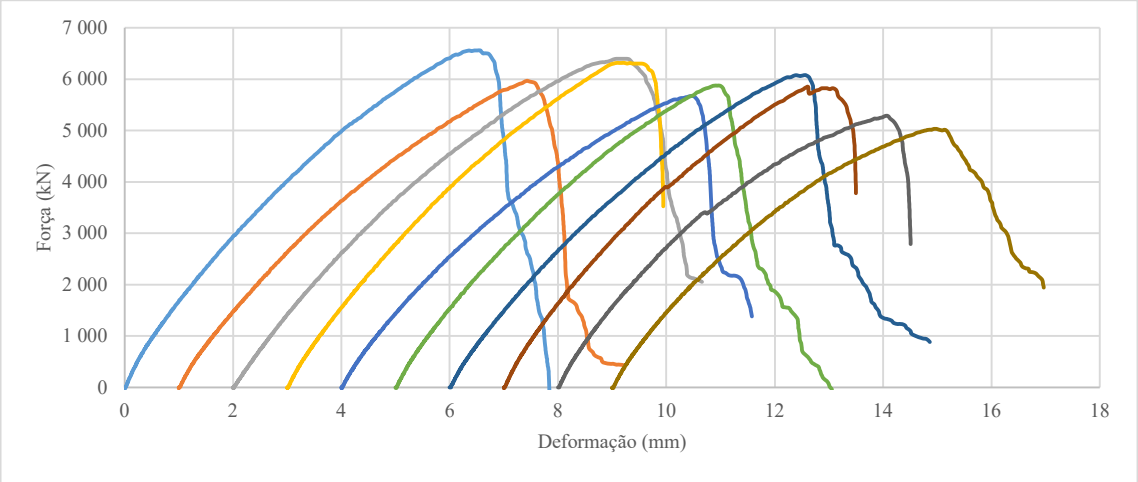
Fonte: Acervo pessoal prof. Natália Correia (2023)

Figura 66-Ensaio de tração no geotêxtil tecido, amostra exumada, sentido longitudinal.



Fonte: Autoria própria.

Figura 67-Ensaio de tração no geotêxtil tecido, amostra exumada, sentido transversal.



Fonte: Autoria própria.

Por último, foram coletadas amostras do geotêxtil exposto as condições intempéricas (Figura 68), sem contato com o fluido presente no ponde para avaliação da degradação proveniente dos raios ultravioletas. Os dados são expostos nas Tabela 31 e Tabela 32

Tabela 31-Resultado de resistência a tração das amostras exposta ao sol, sentido longitudinal.

Corpo de prova	Largura (mm)	Compr. Base (mm)	Força Max. (N)	Força/Larg (N/mm)	Deformação (mm)	Deformação específica (%)
Número CPs	10	10	10	10	10	10
Média	50	75	4114	82,28	8,764	11,690
Mediana	50	75	4110	82,2	8,753	11,670
Desv. Padrão	0	0	171,2	3,425	0,462	0,616
Coef. Var. (%)	0	0	4,162	4,162	5,267	5,267
Mínimo	50	75	3862	77,24	8,031	10,710
Máximo	50	75	4398	87,96	9,642	12,860

Fonte: Autoria própria.

Tabela 32-Resultado de resistência a tração das amostras exposta ao sol, sentido transversal.

Corpo de prova	Largura (mm)	Compr. Base (mm)	Força Max. (N)	Força/Larg (N/mm)	Deformação (mm)	Deformação específica (%)
Número CPs	10	10	10	10	10	10
Média	50	75	2565	51,3	2,480	3,307
Mediana	50	75	2514	50,28	2,386	3,182
Desv. Padrão	0	0	290	5,799	0,286	0,382
Coef. Var. (%)	0	0	11,3	11,3	11,550	11,550
Mínimo	50	75	2213	44,25	2,171	2,895
Máximo	50	75	2963	59,27	3,144	4,193

Fonte: Autoria própria.

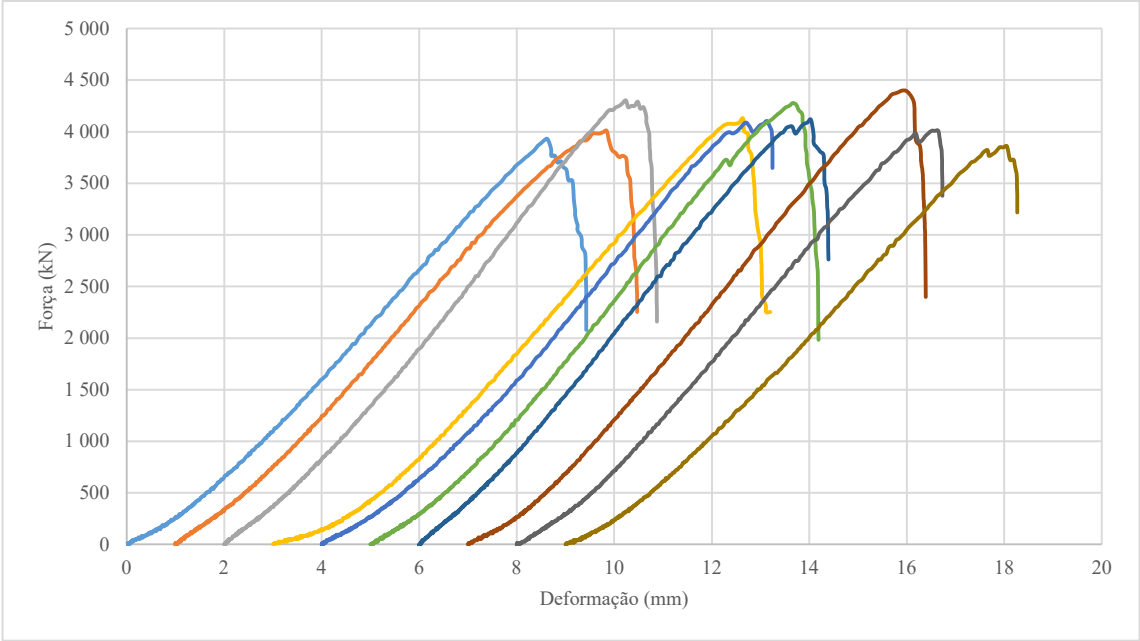
Figura 68-Amostras de geotêxtil tecido expostas ao sol, rompidas após ensaio de tração de faixa estreita.



Fonte: Acervo pessoal prof. Natália Correia (2023)

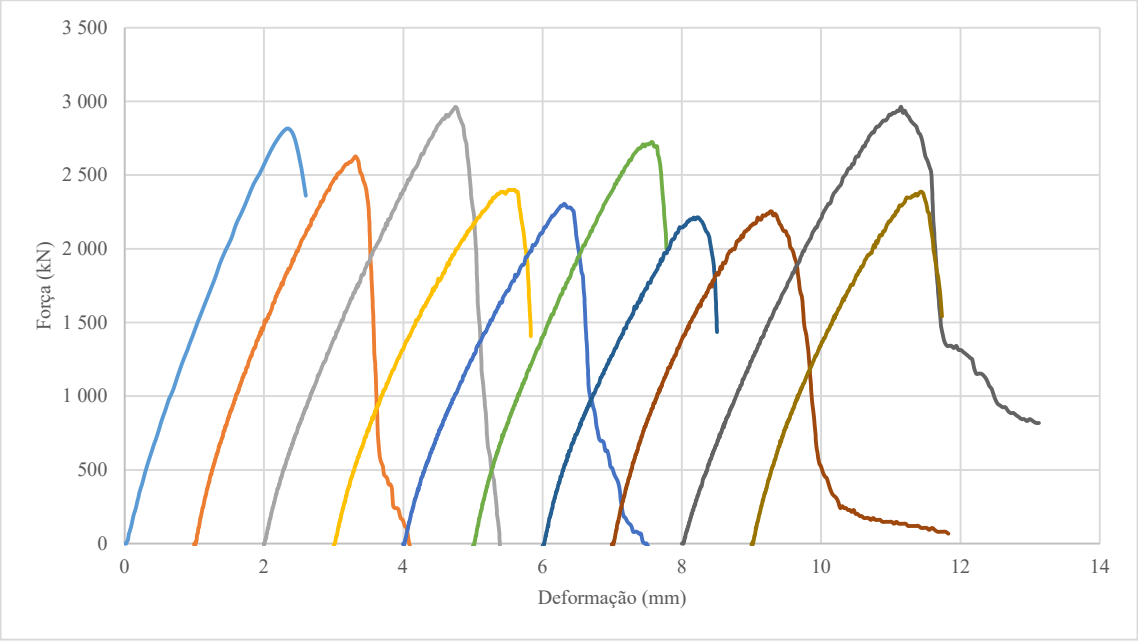
Ao analisar os gráficos obtidos nos ensaios de tração das amostras expostas ao sol (Figura 69 e Figura 70), temos o formato da curva similar aos ensaios de tração das amostras exumadas, no entanto a resistência foi seriamente degradada, apresentando valores de tração até a ruptura inferiores aos obtidos nas amostras exumadas.

Figura 69-Ensaio de tração no geotêxtil tecido, amostra exposta ao sol, sentido longitudinal.



Fonte: Autoria própria.

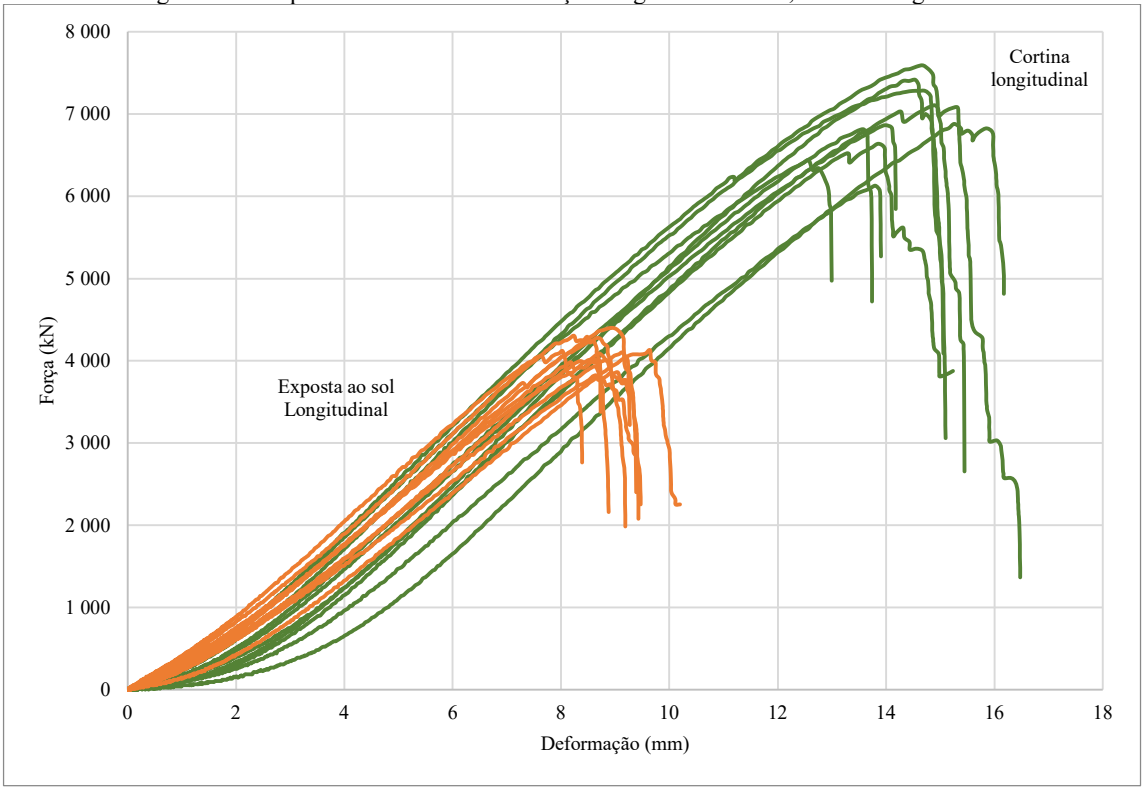
Figura 70-Ensaio de tração no geotêxtil tecido, amostra exposta ao sol, sentido transversal.



Fonte: Autoria própria.

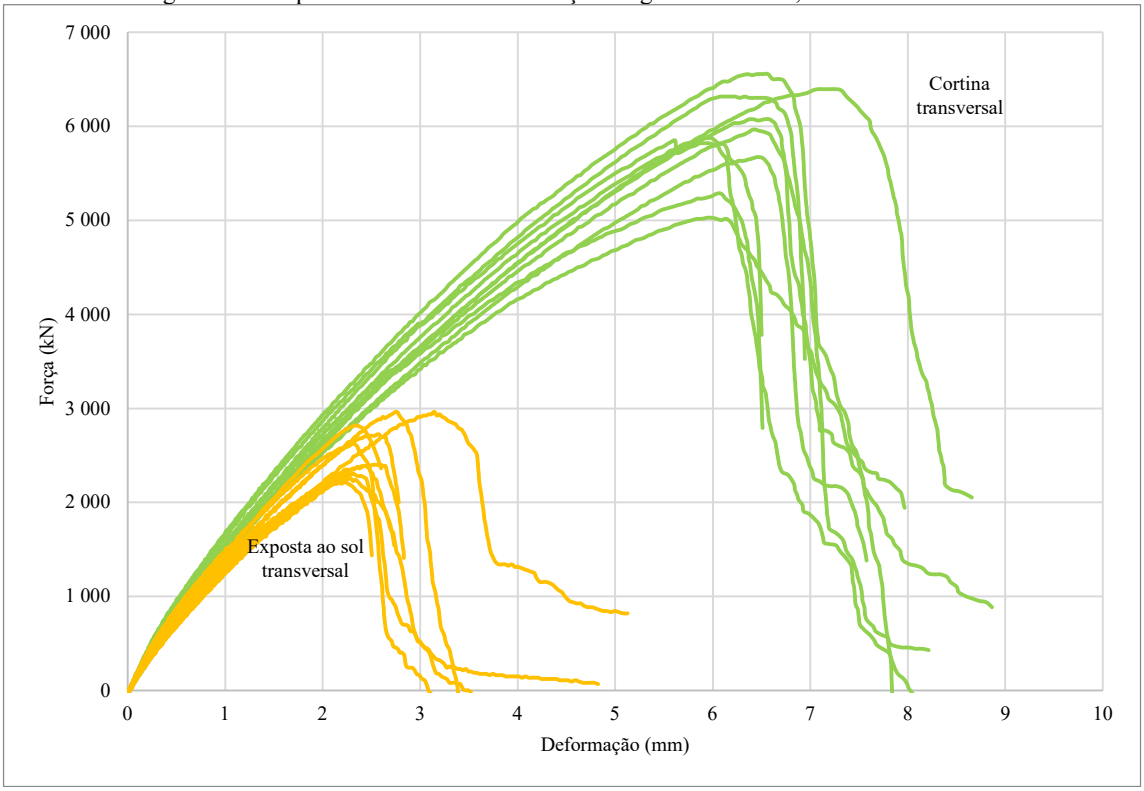
Ao analisar os dados em conjunto é possível identificar que as curvas obtidas nos ensaios de tração das amostras exumadas, comparados aos gráficos de amostras expostas ao sol apresentam a mesma forma, nas direções longitudinal (Figura 71) e transversal (Figura 72). No entanto, em ambos os ensaios as amostras expostas ao sol romperam com uma força menor. Tal comportamento indica que o coeficiente de elasticidade do geotêxtil não alterou, mas a sua resistência a tração diminuiu perante a exposição ao sol.

Figura 71-Comparativo entre ensaio de tração no geotêxtil tecido, sentido longitudinal.



Fonte: Autoria própria.

Figura 72-Comparativo entre ensaio de tração no geotêxtil tecido, sentido transversal.

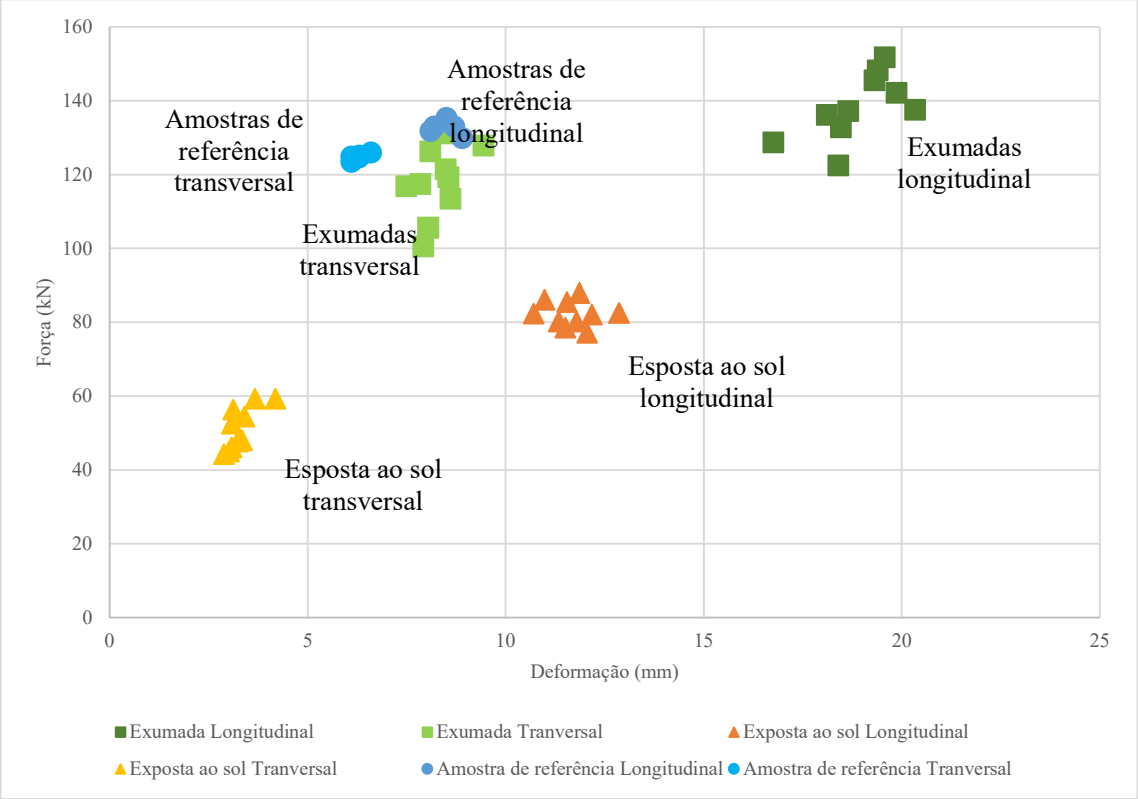


Fonte: Autoria própria.

Para o presente estudo era prevista a comparação dos dados das amostras exumadas e expostas ao sol com amostras virgens, do mesmo lote do geotêxtil adotado em obra. No entanto, as amostras virgens foram extraviadas na mineradora, sendo necessário comparar os resultados obtidos com as amostras de referência, através de dados fornecidos pela fabricante do geotêxtil tecido.

Sendo assim, foram cruzados os dados de força máxima na ruptura, permitindo identificar correlações entre as amostras adotadas no estudo e os valores de referência disponibilizados pela fabricante do geotêxtil tecido (Figura 73).

Figura 73-Comparativo entre força máxima na ruptura e deformação das amostras



Fonte: Autoria própria.

Ao analisar o gráfico na Figura 73 é possível identificar que as amostras expostas ao sol apresentam uma degradação clara, sendo necessária uma força inferior para romper as fibras, se comparada as demais amostras. Em termos percentuais as amostras expostas ao sol tiveram redução de tração na ordem de 38% na longitudinal e 59% na transversal, já as amostras exumadas tiveram um aumento relativo de resistência a tração na longitudinal de 4% e uma redução na direção transversal de 6%.

As amostras exumadas e expostas ao sol apresentam uma deformação até duas vezes maior que as amostras de referência na direção longitudinal. Uma das causas possíveis seria a

diferença entre os lotes de amostras, ou um enrijecimento dos laminetes em função da exposição as condições da obra. Um destaque deve ser dado ao fato de que o sentido longitudinal é o sentido de maior requisição em condição de obra, sendo responsável por transferir as tensões do fluxo sobre a cortina aos cabos de ancoragem.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os trabalhos de pesquisa realizados visaram avaliar o desempenho de estruturas de contenção de sedimentos, tais como cortinas de turbidez (silt curtain) e cortinas de controle de sedimentos (silt fence) por meio de experimento de campo em estruturas suscetíveis a picos de vazão, localizadas a jusante de uma pilha de estéril de uma mineração de rocha fosfática no Alto Paranaíba, Minas Gerais, Brasil.

Ao longo dos dois anos de pesquisa as estruturas foram expostas a condições experimentais distintas em situação de obra real, regidos pelo clima da região, sendo caracterizados cinco cenários, sendo eles: Cortina de controle de sedimentos instalado na saída do ponde (2021);Cortinas de turbidez em configuração de labirinto com o ponde vertendo (2021-2022);Cortinas de turbidez em configuração de labirinto com o ponde não vertendo (2021-2022);Cortinas de turbidez em configuração em “U” com o ponde vertendo (2022-2023);Cortinas de turbidez em configuração em “U” com o ponde não vertendo (2022-2023);

Apenas no primeiro cenário a cortina de controle de sedimentos foi adotada, no entanto, a estrutura não suportou as cargas hidráulicas, após elevação do nível da água a montante da estrutura, apresentando falha estrutural e não permitindo a coleta de dados.

Inicialmente nos cenários onde a configuração das cortinas foi em labirinto a eficiência do sistema foi elevada, mas permitindo a homogeneização do fluido ao longo do tempo degradando a eficiência do sistema, culminando em eficiências médias de 3,58% com o ponde vertendo e 3,19% com o ponde não vertendo, apresentando momentos com eficiência negativa.

Já os cenários, nos quais as cortinas foram instaladas contendo o fluxo em configuração em “U” os resultados identificados com o ponde vertendo é de 19,29%, sendo que para o regime lêntico a eficiência é praticamente nula com 0,43%, apresentando momentos com eficiência negativa.

Sendo assim, após dois períodos de chuva com as cortinas de turbidez expostas a intempéries e picos de vazão, sem que houvesse danos ao geotêxtil que compõe o núcleo

filtrante das cortinas, demonstraram boa durabilidade para sua aplicação na mineração, podendo ser adotadas em sistemas de drenagens de pilhas de estéril de forma eficaz.

As cortinas de turbidez apresentam efetividade regular, desde que expostas a um fluxo constante (ambiente lótico) característico de quando o ponde esteve vertendo. Em ambientes de baixa energia e/ou com fluxo reverso as cortinas tendem a ser pouco efetivas. Dentre as configurações adotadas a configuração em "U" apresentou melhor resultado, havendo a necessidade de caracterizar a fonte de turbidez para contê-la de forma correta.

Ao avaliar os geotêxteis adotados na pesquisa é possível identificar que o geotêxtil tecido da cortina apresentou sinais de degradação na amostra exumada, mas inferiores aos danos identificados na amostra exposta ao sol, como constatados pelas imagens de MEV e ensaios de tração. O geotêxtil não tecido não ficou tempo suficiente exposto a obra para avaliação de degradação.

A alteração na direção e do regime de fluxo no interior do ponde afetou diretamente a eficiência das cortinas de turbidez. Com níveis da água abaixo da cota de vertimento não há um fluxo constante e unidirecional no interior do ponde, com momentos de inversão do fluxo em função dos ventos fortes. A inversão do fluxo causa redução da eficiência do sistema de clarificação, promovendo a homogeneização do fluido (Configuração em labirinto) e até inversão da eficiência (Configuração em "U").

As cortinas resistiram a dois períodos de chuvas, expostas a intempéries e picos de vazão e não houve danos ao geotêxtil do núcleo filtrante das cortinas, demonstrando boa durabilidade para sua aplicação na mineração. No entanto, recomenda-se a limpeza mecânica das cortinas entre os usos para evitar que o solo impregnado entre as fibras colmate o núcleo filtrante.

As cortinas de controle de sedimentos, *silt fence*, apresentaram falha estrutural e não são indicadas para aplicações em sistemas de drenagem nas quais se tenha alto fluxo ou com altas cargas hidrodinâmicas, sendo aconselhadas para áreas com processos erosivos com fluxo laminar de baixa vazão.

Ao considerar a aplicabilidade na mineração, é possível concluir que as cortinas de controle de sedimentos (silt fence) não são indicadas para aplicações em sistemas de drenagem nas quais o fluxo aquoso apresente alto fluxo ou com altas cargas hidrodinâmicas, sendo aconselhadas para áreas com processos erosivos com fluxo laminar de baixa vazão. O estudo da aplicação de cortinas de turbidez a sistemas de drenagem envolve uma série de aspectos isolados que necessitam de investigação aprofundada.

Com base nos resultados obtidos nessa pesquisa são apresentadas a seguir, sugestões de pesquisas que podem complementar o presente estudo:

- A necessidade de fluxo contra as cortinas para elevar a sua eficiência sugere a possibilidade de maior eficiência se aplicadas a canais do que na estrutura de contenção final, sendo necessária a realizações de experimentos nesse sentido;
- O material adotado como núcleo filtrante foi um geotêxtil tecido composto por laminetes de polipropileno de alta tenacidade, alta resistência a tração, elevada permeabilidade, sendo sugerida o desenvolvimento e a avaliação de geotêxtil não tecido com menor abertura de filtração, face ao fator de impregnação obtido nas *silt fence*, visando elevar a retenção de partículas;
- Adotar medidores de turbidez automatizados e correlacionados com a pluviometria para melhor avaliação da eficiência no processo de clarificação em decorrência das chuvas;
- Avaliar a possibilidade de adoção de múltiplas cortinas em sistemas de pico de vazão;
- Realizar ensaios intermediários simulando picos de vazão nas estruturas.
- Realizar estudos de diagnóstico da erodibilidade da pilha para proposição de alternativas na área fonte para redução de aporte de sedimentos na estrutura de contenção.

7. REFERÊNCIAS

ABNT NBR 7181. **Solo - Análise granulométrica**. Brasil ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, , 2016.

ABNT NBR 10004. **Resíduos sólidos - Classificação**. Brasil ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, , 2004.

ABNT NBR 13029. **Mineração - Elaboração e apresentação de projeto de disposição de estéril em pilha**. Brasil ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, , 2017.

ABNT NBR 16097. **Solo - Determinação do teor de umidade - Métodos expeditos de ensaio**. Brasil ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, , 2012.

ABNT NBR ISO 12236. **Geossintéticos - Ensaio de puncionamento estático (punção CBR)**. Brasil ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, , 2013.

ABNT NBR ISO 13433. **Geotêxteis e produtos correlatos GTX&PC - Ensaio de perfuração dinâmica (cone)**. Brasil ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, , 2013.

AGUIAR, P. R.; VERTEMATTI, J. C. Aplicações em Filtração. Em: VERTEMATTI, J. C. (Ed.). **Manual Brasileiro de Geossintéticos**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2015. v. 1p. 247–274.

ASTM D4751-21A. **Standard Test Methods for Determining Apparent Opening Size of a Geotextile**. ASTM - American Society for Testing and Materials, , 2021.

ASTM D5035-11. **Standard Test Method for Breaking Force and Elongation of Textile Fabrics (Strip Method)**. , 2019.

BERTONI, J.; NETO, F. L. **Conservação do Solo**. 6. ed. São Paulo: Icone, 2008.

BEZUIJEN, A.; PILARCZYK, K. W. **Geosynthetics in hydraulic and coastal engineering**. 5º European Geosynthetics Congress. **Anais**...Valencia: IGS Spain, 16 set. 2012.

BRASIL. **RESOLUÇÃO CONAMA N° 357**. **Diário Oficial da União** Brasil, 17 mar. 2005.

BRAY, R. N. **Environmental aspects of dredging**. 1. ed. Bray, R. N.: Taylor & Francis, 2008.

BUENO, B. S.; VILAR, O. M. Propriedades ensaios e normas. Em: VERTEMATTI, J. C. (Ed.). **Manual brasileiro de geossintéticos**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2015. v. 1p. 47–84.

CHEAH, C. et al. Measuring hydraulic properties of geotextiles after installation damage. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 45, n. 5, p. 462–470, 1 out. 2017.

COSTA, C. M. L. et al. Avaliação de recomendações normativas sobre o uso de ensaios no controle de qualidade de fabricação de geossintéticos. **Polímeros**, v. 18, n. 2, p. 158–169, jun. 2008.

DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I.; MACHADO, G. **Microscopia eletrônica de varredura : aplicações e preparação de amostras : materiais poliméricos, metálicos e semicondutores**. I ed. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007.

DIEDERICH, R. **Evaluation of Installation Damage of Geotextiles: A correlation to Index Tests**. Fifth Conference on Geosynthetics. **Anais**...YiChang: jul. 2000.

DNER/DRDTC. **Solos - preparação de amostras para ensaios de caracterização**. BRASIL: [s.n.].

DTMB. **State of Michigan soil erosion and sedimentation control guidebook**. , 2019.

FIORUCCI, A. R.; FILHO, E. B. A importância do oxigênio dissolvido em ecossistemas aquáticos. **QNEsc**, nov. 2005.

FRANCINGUES, N. R.; PALERMO, M. R. Silt curtains as a dredging project management practice. **ERDC TN-DOER-E21**, p. 1–18, set. 2005.

FRANCINGUES, N. R.; THOMPSON, D. W. **Control of resuspended sediments in dredging projects**. 26th Annual WEDA Conference. **Anais**...San Diego: WEDA, 2006.

GARDONI, M. DAS G. A. **Estudo do comportamento dreno-filtrante de geossintéticos sob compressão**. Tese de Doutorado em Geotecnia—Brasília: UNB, jun. 2000.

GARDONI, M. DAS G. A.; PALMEIRA, E. M. Interpretation of the Gradient Ratio Test for Geotextile Filtration Design. **Geosynthetics International**, v. 7, jul. 2000.

GIROUD, J. P. **Development of criteria for geotextile and granular filters**. [s.l.] International Geosynthetic Society, 2010.

IGS BRASIL. **Características requeridas para o emprego de geossintéticos – Parte 1**. [s.l.] IGS Brasil, 2020.

JOHANSON, E. E. **An analysis of the functional capabilities and performance of silt curtains**. Wilmington: JFB Scientific Corporation, jul. 1978.

KENNEY, T. C.; LAU, D. Internal stability of granular filters. **Department of Civil Engineering, University of Toronto**, p. 215–225, fev. 1985.

LAFLEUR, J. Selection of geotextiles to filter broadly graded cohesionless soils. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 17, n. 5–6, p. 299–312, out. 1999.

LOPES P, M.; LOPES L, M. DE. **A durabilidade dos geossintéticos**. 1. ed. Porto: FEUP, 2010. v. 1

MOREIRA, C. Microscópio ótico. **Ciência Elementar**, p. 1–3, out. 2013.

NYSDOT. Geosynthetic design. Em: **Geotechnical design manual**. Nova Iorque: [s.n.]. v. 2018p. 43–44.

OLIVEIRA, E. P. et al. Avaliação e desenvolvimento experimental para testes de barreiras flutuantes visando à contenção de sólidos suspensos. **Revista DAE**, v. 66, n. 213, p. 36–47, out. 2018.

OLIVEIRA, E. P. et al. Evaluation of silt curtain in the reduction of suspended solids. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 48, n. 6, p. 983–988, 1 dez. 2020a.

OLIVEIRA, E. P. et al. Evaluation of silt curtain in the reduction of suspended solids. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 48, n. 6, p. 983–988, 1 dez. 2020b.

PALERMO, M. R. et al. **Technical Guidelines for Environmental Dredging of Contaminated Sediments**. Vicksburg: US Army Corps of Engineers, set. 2008.

PALMEIRA, E. M. **Geossintéticos em geotecnia e meio ambiente**. 1. ed. São Paulo: Oficina de texto, 2018.

PILARCZYK, K. W. **Geosynthetics and geosystems in hydraulic and coastal engineering**. 1. ed. New York: Taylor & Francis, 2000. v. 1

PINTO, C. DE S. **Curso Básico de Mecânica dos solos**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2000.

PROMINER. **Relatório de análise do monitoramento da qualidade do ar**. Patrocínio: PROMINER, 2021.

RADERMACHER, M. et al. Efficiency of Hanging Silt Curtains in Crossflow. **Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering**, v. 142, n. 1, p. 1–31, jan. 2016.

RICHARDSON, G. R.; MIDDLEBROOKS, P. **A simplifield design method for silt fences**. Geosynthetics Conference. **Anais**...Saint Paul, MN: 1991.

SIEIRA, A. C. C. F. **Estudo experimental dos mecanismos de interação solo-geogrelha**. Tese de doutorado—Rio de Janeiro: PUC-RIO, abr. 2003.

SILVA, E. M. DA; MALVINO, S. S. B. Análise climática do município de Patrocínio (MG). **Caminhos da Geografia**, p. 93–108, out. 2005.

SILVA, V. C. Estimativa da erosão atual da bacia do Rio Paracatu (MG / GO / DF). **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 34, n. 3, p. 147–159, 2004.

SUGUIO, K. **Geologia Sedimentar**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2003.

TECNAL. **Analisador multiparâmetro**. Disponível em: <https://l1nq.com/jrQVV>. Acesso em: 4 out. 2021.

TONIN, F. B. **Mecânica de solos - Revisão: Conceitos de solos**. Avaré: Faculdade Sudoeste Paulista, 2015.

TREJOS GALVIS, H. L. **Avaliação da abertura de filtração de geotêxteis sob confinamento e parcialmente colmatados**. Brasília: UNB, mar. 2016.

VOGBR. **Projeto Executivo do Depósito de Estéril - RL-0000SR-X-01974**. Belo Horizonte: VOGBR, 2016a.

VOGBR. **Projeto executivo do ponde - RL-0000SR-X-01804_Rev_1**. Belo Horizonte: VOGBR, 2016b.

ANEXOS

ANEXO I – Dados coltados durante o estudo

Data	Hora	Localização	Vertendo	Temperatura (ºC)	Saturação de oxigênio dissolvido %	Oxigênio Dissolvido (mg/L)	Condutividade (µS/cm)	Sólidos totais dissolvidos (mg/L)	pH	Potencial redox (mV)	Turbidez (NTU)	Direção do vento
10/10/2021	11:00:00	C	Não									
14/10/2021	10:15:00	C	Não								234	
15/10/2021	14:00:00	C	Não								2752	
26/10/2021	14:20:00	A	Sim								3804	
26/10/2021	14:22:00	B	Sim								153	
26/10/2021	14:24:00	C	Sim								297	
28/10/2021	10:00:00	A	Não								605	
28/10/2021	10:02:00	B	Não								581	
28/10/2021	10:04:00	C	Não								237	
01/11/2021	10:00:00	A	Não								469	
01/11/2021	10:02:00	B	Não								341	
01/11/2021	10:04:00	C	Não								319	
04/11/2021	14:00:00	B	Não	27.2	105%		14.5				492.38	
08/11/2021	10:00:00	A	Não	29.8	84%		13.5				521.35	NE
08/11/2021	10:02:00	B	Não	30.1	85%		13.1				458.24	NE
08/11/2021	10:04:00	C	Não	30.3	83%		13.1					NE
11/11/2021	10:00:00	A	Não	23.1	77%		13.3				187.85	N
11/11/2021	10:02:00	A	Não	23.1	77%		15.7				330.99	N
11/11/2021	10:04:00	B	Não	23.1	77%		12.6				182.09	N
11/11/2021	10:06:00	B	Não	23	78%		13.6				346.94	N
11/11/2021	10:08:00	C	Não	23.2	83%		11.9				177.75	N
11/11/2021	10:10:00	C	Não	23.1	85%		16.4				280.14	N
12/11/2021	11:27:00	A	Não	22.4	82%		9.5				56.14	NE
12/11/2021	11:29:00	B	Não	23.4	84%		9.5				41.5	NE
12/11/2021	11:31:00	C	Não	22.3	82%		9.3				45.21	NE
19/11/2021	10:00:00	A	Não	25.6	83%		9.5				89.57	N
19/11/2021	10:02:00	B	Não	26	83%		9.5					N
19/11/2021	10:04:00	C	Não	26.5	84%		9.7				85.62	N
26/11/2021	11:31:00	A	Não	26.2	86%	6.95		4			195.66	N
26/11/2021	11:32:00	A	Não								218	N

ANEXO I – Dados coltados durante o estudo

Data	Hora	Localização	Vertendo	Temperatura (ºC)	Saturação de oxigênio dissolvido %	Oxigênio Dissolvido (mg/L)	Condutividade (µS/cm)	Sólidos totais dissolvidos (mg/L)	pH	Potencial redox (mV)	Turbidez (NTU)	Direção do vento
26/11/2021	11:36:00	B	Não	26.2	87%	6.99		8			219.42	N
26/11/2021	11:37:00	B	Não								247	N
26/11/2021	11:41:00	C	Não	27.4	85%	6.74		7			238.17	N
26/11/2021	11:42:00	C	Não								253	N
01/12/2021	11:12:00	A	Não	27.8	87%	6.81	17.8	11			367.14	NW
01/12/2021	11:15:00	B	Não	27.1	84%	6.67	13.6	8			358.79	NW
01/12/2021	11:27:00	C	Não	29.6	88%	6.67	14	8			358.7	NW
03/12/2021	10:02:00	A	Não	23.6	78%	6.65	15.9	11			281.81	SE
03/12/2021	10:04:00	A	Não	23.6	79%	6.67	13.5	9			285.03	SE
03/12/2021	10:07:00	A	Não	23.5	79%	6.68	13.1	9			391.95	SE
03/12/2021	11:43:00	A	Não								408	SE
03/12/2021	11:44:00	A	Não								417	SE
03/12/2021	11:14:00	A	Não								443	SE
03/12/2021	10:11:00	B	Não	23.7	78%	6.62	13.1	9			389.33	SE
03/12/2021	10:14:00	B	Não	23.8	79%	6.69	13	9			395.59	SE
03/12/2021	10:15:00	B	Não	23.7	79%	6.71	13	9			389.29	SE
03/12/2021	10:04:00	B	Não								444	SE
03/12/2021	10:06:00	B	Não								423	SE
03/12/2021	10:09:00	B	Não								421	SE
03/12/2021	10:22:00	C	Não	24.4	80%	6.7	13.3	9			271.55	SE
03/12/2021	10:26:00	C	Não	24.3	80%	6.69	13.4	9			275.46	SE
03/12/2021	10:32:00	C	Não	24.7	80%	6.67	13.2	9			369.82	SE
03/12/2021	10:13:00	C	Não								400	SE
03/12/2021	10:16:00	C	Não								409	SE
03/12/2021	10:17:00	C	Não								397	SE
07/12/2021	11:07:00	A	Não	29.3	85%	6.51	16.5	10			355.25	N
07/12/2021	11:10:00	B	Não	30.2	85%	6.4	15.5	9			348.89	N
07/12/2021	11:13:00	C	Não	31	88%	6.51	15.8	9			351.4	N
17/12/2021	09:52:00	A	Não	23.4	81%	6.87	17	11			550.09	E
17/12/2021	09:56:00	B	Não	23.5	80%	6.8	17.9	12			550.9	E

ANEXO I – Dados coltados durante o estudo

Data	Hora	Localização	Vertendo	Temperatura (ºC)	Saturação de oxigênio dissolvido %	Oxigênio Dissolvido (mg/L)	Condutividade (µS/cm)	Sólidos totais dissolvidos (mg/L)	pH	Potencial redox (mV)	Turbidez (NTU)	Direção do vento
17/12/2021	10:02:00	C	Não	23.6	81%	6.85	16.3	11			532.72	E
20/12/2021	13:38:00	A	Não	27.7	85%	6.69	17.4	11			850.72	E
20/12/2021	13:42:00	B	Não	27.6	85%	6.67	17.1	1			826.74	E
20/12/2021	13:49:00	C	Não	29.3	87%	6.63	16.7	10			794.25	E
21/12/2021	11:26:00	A	Não	26.4	84%	6.8	16	10			794.19	NE
21/12/2021	11:30:00	B	Não	26.5	84%	6.77	15.5	10			788.32	NE
21/12/2021	11:34:00	C	Não	27.2	86%	6.87	15.4	10			756.83	NE
29/12/2021	14:51:00	A	Não	29.9	88%	6.67	17.5	10			693.09	NE
29/12/2021	14:53:00	B	Não	31.3	88%	6.49	17.2	10			672.56	NE
29/12/2021	14:56:00	C	Não	32	94%	6.85	17	10			669.23	NE
03/01/2022	10:19:00	A	Sim	22.4	82%	7.14	16.4	11	8.13		863.18	NE
03/01/2022	10:22:00	B	Sim	22.6	82%	7.12	13	9	7.85		857.63	NE
03/01/2022	10:24:00	C	Sim	23.1	82%	7.04	13	9	7.61		819.65	NE
06/01/2022	10:26:00	A	Sim	22.2	84%	7.27	12.9	9	7.72	138.5	975.68	NE
06/01/2022	10:29:00	B	Sim	22.8	83%	7.12	12.3	8	7.44	155.5	981.36	NE
06/01/2022	10:33:00	C	Sim	23.7	83%	7.04	12.1	8	7.21	171.1	924.22	NE
07/01/2022	09:39:00	A	Sim	21.6	80%	7.04	11.7	8	7.57	121.6	1073.72	N
07/01/2022	09:40:00	B	Sim	21.5	79%	6.94	11.8	8	7.46	127.2	1070.76	N
07/01/2022	09:41:00	C	Sim	21.5	79%	6.97	11.4	8	7.33	135.4	1015.64	N
10/01/2022	15:53:00	A	Sim	24	76%	6.43	14.4	10	7.97	82	772.63	NW
10/01/2022	15:55:00	B	Sim	24.2	76%	6.41	11.9	8	7.37	99	765.83	NW
10/01/2022	15:59:00	C	Sim	24.3	81%	6.76	11.5	8	7.15	120.2	759.56	NW
24/01/2022	14:34:00	A	Não	31.6	87%	6.42	29.3	17	8.36	22.3	42.01	N
24/01/2022	14:37:00	B	Não	32.3	93%	6.73	24.2	14	8.4	62.1	58.76	N
24/01/2022	14:41:00	C	Não	34.2	95%	6.65	27.9	15	8.16	92.4	89.28	N
26/01/2022	16:12:00	A	Não	27.5	89%	6.99	22.8	14	8.69	65.6	95.08	NE
26/01/2022	16:16:00	B	Não	27.9	88%	6.93	22.4	14	8.3	99.9	98.13	NE
26/01/2022	16:19:00	C	Não	27.7	88%	6.89	23.1	14	8.09	110.5	77.47	NE
07/02/2022	09:31:00	A	Sim	22.4	79%	6.87	25.7	18	8.24	81.4	777.55	NW
07/02/2022	09:33:00	A	Sim	22.8	80%	6.88	23.7	16	7.65	98.5	784.19	NW

ANEXO I – Dados coltados durante o estudo

Data	Hora	Localização	Vertendo	Temperatura (ºC)	Saturação de oxigênio dissolvido %	Oxigênio Dissolvido (mg/L)	Condutividade (µS/cm)	Sólidos totais dissolvidos (mg/L)	pH	Potencial redox (mV)	Turbidez (NTU)	Direção do vento
07/02/2022	09:36:00	B	Sim	22.7	80%	6.92	22.9	16	7.44	114.6	820.94	NW
07/02/2022	09:39:00	C	Sim	22.7	80%	6.94	22.7	15	7.42	121.5	801.24	NW
07/02/2022	09:43:00	C	Sim	22.8	81%	6.98	21.1	14	7.41	148	806.56	NW
10/02/2022	11:41:00	A	Sim	22	83%	7.26	7.2	5	8.19	102.2	563.42	NE
10/02/2022	11:42:00	A	Sim	22.4	83%	7.19	15.8	11	8	108.6	586.76	NE
10/02/2022	11:44:00	C	Sim	22.8	84%	7.21	18.5	13	7.55	127	534.61	NE
14/02/2022	09:53:00	A	Não	23.8	85%	7.16	19.2	13	7.58	128.9	720.54	NE
14/02/2022	09:55:00	B	Não	23.4	84%	7.12	18.7	13	7.56	134.1	711.01	NE
14/02/2022	09:58:00	C	Não	23.5	83%	7.08	18.6	12	7.38	139.1	704.72	NE
21/02/2022	10:05:00	A	Não	24.8	86%	7.14	19.7	13	8.25	105	499.68	SE
21/02/2022	10:07:00	B	Não	24.4	86%	7.17	20.3	13	7.8	121.2	485.97	SE
21/02/2022	10:10:00	C	Não	25.4	91%	7.49	18.9	12	7.73	126.6	458.81	SE
25/02/2022	10:10:00	A	Não	26.3	88%	7.07	20.1	13	7.51	166.9	454.77	S
25/02/2022	10:15:00	B	Não	26	87%	7.06	20.3	13	7.69	160	460.21	S
25/02/2022	10:18:00	C	Não	27.2	92%	7.29	20.6	13	7.8	165.1	416.14	S
03/03/2022	14:27:00	A	Não	31.9	89%	6.51	26.1	15	8.42	51.2	312.88	N
03/03/2022	14:30:00	B	Não	33.2	90%	6.47	24.2	14	8.04	79.7	337.35	N
03/03/2022	14:31:00	C	Não	33.7	85%	6.06	31.5	18	8.22	49.8	333.39	N
07/03/2022	09:45:00	A	Não	23.2	80%	6.83	23.9	16	8.44	84.8	400.06	SW
07/03/2022	09:48:00	B	Não	23.4	80%	6.82	19	13	7.94	96.8	411.3	SW
07/03/2022	09:51:00	C	Não	23.3	80%	6.82	18.8	13	7.69	102.7	405.91	SW
11/03/2022	08:41:00	A	Não	23.4	85%	7.23	18.7	13	7.81	123.8	518.49	S
11/03/2022	14:02:00	A	Não	26.8	87%	6.95	25	16	8.76	99.3	328.45	NE
11/03/2022	14:11:00	A	Não	27.4	89%	7.08	21.2	13	8.08	143.9	333.39	NE
11/03/2022	14:22:00	A	Não	27.9	89%	6.94	16.4	10	7.7	177.9	338.16	NE
11/03/2022	16:05:00	A	Não	28.3	92%	7.13	23	14	8.13	117.4	330.09	N
11/03/2022	16:08:00	A	Não	28.4	88%	6.87	22.4	14	8.39	130.2	340.68	N
11/03/2022	08:42:00	B	Não	23.3	84%	7.14	17.8	12	7.69	115.2	441.74	S
11/03/2022	14:05:00	B	Não	27.1	86%	6.87	21.3	13	8.41	111.2	334.1	NE
11/03/2022	14:13:00	B	Não	27.3	88%	6.95	20.8	13	7.89	159.3	332.2	NE

ANEXO I – Dados coltados durante o estudo

Data	Hora	Localização	Vertendo	Temperatura (ºC)	Saturação de oxigênio dissolvido %	Oxigênio Dissolvido (mg/L)	Condutividade (µS/cm)	Sólidos totais dissolvidos (mg/L)	pH	Potencial redox (mV)	Turbidez (NTU)	Direção do vento
11/03/2022	14:23:00	B	Não	27.6	87%	6.87	20.6	13	7.69	180.3	337.77	NE
11/03/2022	16:10:00	B	Não	28.4	88%	6.83	21.2	13	7.81	143	345.08	N
11/03/2022	08:47:00	C	Não	23.4	82%	6.98	17.8	12	7.59	113	363.64	S
11/03/2022	14:07:00	C	Não	28.6	87%	6.76	22.2	14	8.04	118.2	367.43	NE
11/03/2022	14:17:00	C	Não	28.5	89%	6.88	21.3	13	7.75	156.4	360.52	NE
11/03/2022	14:25:00	C	Não	28.3	87%	6.8	18.1	11	7.65	171.3	349.69	NE
11/03/2022	16:11:00	C	Não	28.6	88%	6.84	21.4	13	7.72	141.5	343.11	N
12/03/2022	08:22:00	A	Não	24.5	83%	6.91	21.6	14	7.03	153.5	315.86	SW
12/03/2022	08:30:00	B	Não	25.3	83%	6.85	20.7	13	7.06	158.8	312.92	SW
12/03/2022	08:33:00	C	Não	25.1	84%	6.92	21.3	14	7.1	160.8	316.19	SW
14/03/2022	09:36:00	A	Não	23.6	82%	6.96	11.2	8	6.8	149.9	294.97	E
14/03/2022	09:39:00	B	Não	23.7	82%	6.96	11.6	8	6.81	148.4	293.64	E
14/03/2022	09:40:00	C	Não	23.7	82%	6.97	22.6	15	6.85	147.7	291.06	E
17/03/2022	14:09:00	A	Não	27	88%	7.04	36	23	7.06	140.2	322.36	NE
17/03/2022	14:12:00	B	Não	27.1	86%	6.87	32.1	20	7.23	133.7	323.06	NE
17/03/2022	14:16:00	C	Não	27.3	87%	6.89	36	22	7.26	141.1	329.09	NE
21/03/2022	11:01:00	A	Não	25.6	86%	7.04	35.8	23	6.94	147.9	220.88	E
21/03/2022	11:05:00	B	Não	25.8	87%	7.05	35.3	23	7.12	140.6	227.81	E
21/03/2022	11:08:00	C	Não	26.4	89%	7.16	35.4	22	7.26	134	206.67	E
28/03/2022	10:03:00	A	Não	26	88%	7.18	42.2	27	8.72	76	106.72	S
28/03/2022	10:05:00	B	Não	25.7	87%	7.12	35.9	23	8.39	85.7	92.58	S
28/03/2022	10:08:00	C	Não	25.5	87%	7.11	35.2	23	8.28	101.1	95.67	S
01/04/2022	09:28:00	A	Não	25.9	92%	7.44	37.2	24	8.64	53.4	58.96	SE
01/04/2022	09:30:00	B	Não	25.9	90%	7.31	35.6	23	8.55	61.7	62.21	SE
01/04/2022	09:33:00	C	Não	26	91%	7.38	35.7	23	8.45	78.3	62.67	SE
13/04/2022	10:33:00	A	Não	29.2	83%	6.34	41.7	25	8.04	63.7	520.95	0
13/04/2022	10:37:00	B	Não	27.5	81%	6.37	38.9	24	7.81	78.4	545.82	0
13/04/2022	10:42:00	C	Não	29.4	83%	6.36	39	23	7.76	85.7	542.67	0

ANEXO II – Dados de turbiz no ponde prévios ao presente etudo

Data	Hora	Turbidez no Ponde	Córrego Montante	Córrego Juzante	Estrutura vertendo	Data	Hora	Turbidez no Ponde	Córrego Montante	Córrego Juzante	Estrutura vertendo
15/01/2021	12:30:00	1224			Sim	18/03/2021	14:00:00	1067	11.3		Não
18/01/2021	16:00:00	1039	41.6	59.7	Sim	19/03/2021	14:00:00	1722	21.3		Não
19/01/2021	09:30:00	995	27.4	93.3	Sim	22/03/2021	11:50:00	1310	10.01		Não
20/01/2021	09:00:00	993	30.5	40.6	Sim	23/03/2021	11:30:00	943	13.28		Não
21/01/2021	11:00:00	932	27.2	28.3	Sim	24/03/2021	11:30:00	954	9.42		Não
22/01/2021	11:00:00	1079	20.7	61.6	Sim	26/03/2021	11:00:00	1326	19.39		Não
25/01/2021	11:00:00	1258	16.58	57.7	Sim	29/03/2021	11:00:00	1042	46.56		Não
26/01/2021	11:00:00	918	16.04	57.7	Sim	30/03/2021	10:40:00	1184	10.75		Não
27/01/2021	10:30:00	1112	52.8	48.3	Sim	31/03/2021	10:30:00	740	12.55		Não
28/01/2021	10:30:00		19.64	57	Não	01/04/2021	11:00:00	919	12.49		Não
29/01/2021	10:30:00	1027	15.81	32.5	Sim	05/04/2021	11:00:00	1029	12.94		Não
01/02/2021	10:15:00	1276	14.63	28	Sim	06/04/2021	11:30:00	1142	5.71		Não
02/02/2021	10:15:00	1019	11.17	60.2	Sim	08/04/2021	11:30:00	1090	12.46		Não
03/02/2021	11:30:00	1448	13.56	55	Sim	09/04/2021	09:30:00	1188	12.24		Não
04/02/2021	11:00:00	903	13.46	60.5	Sim	12/04/2021	11:00:00	499	10.22		Não
05/02/2021	11:00:00	819	13.46	60.5	Sim	13/04/2021	11:00:00	537	11.19		Não
08/02/2021	11:00:00	2060	16.22	170	Sim	14/04/2021	10:00:00	921	16.93		Não
09/02/2021	11:00:00	1838	18.43	94.7	Sim	15/04/2021	11:00:00	642	34.3		Não
10/02/2021	11:11:00	1978	12.88	80.5	Sim	16/04/2021	11:00:00	815	26		Não
11/02/2021	11:00:00	1480	18.31	70.9	Sim	19/04/2021	11:00:00	379	25.2		Não
12/02/2021	11:00:00	1500	82.3	97.3	Sim	20/04/2021	11:30:00	437	9.9		Não
12/02/2021	14:15:00	1682	52.1	915	Sim	22/04/2021	12:30:00	724	62		Não
18/02/2021	11:15:00	951	15.65		Não	23/04/2021	11:30:00	158	6.14		Não
19/02/2021	09:30:00	798	14.86		Não	26/04/2021	11:00:00	133	15.45		Não
22/02/2021	14:00:00	884	15.9		Não	27/04/2021	11:30:00	449	12.73		Não
23/02/2021	11:00:00	921	12.18		Não	28/04/2021	09:50:00	131	12.11		Não
24/02/2021	11:00:00	676	67.1		Não	29/04/2021	11:30:00	432	11.25		Não
25/02/2021	11:15:00	512	12.59		Não	30/04/2021	11:30:00	1061	25.4		Não
26/02/2021	11:00:00	987	33.8		Não	03/05/2021	11:30:00	581	13.28		Não
01/03/2021	11:00:00	1380	20.1		Não	04/05/2021	11:30:00	944	20.2		Não
02/03/2021	11:35:00	1244	12.28		Não	05/05/2021	11:30:00	446	12.23		Não
03/03/2021	11:40:00	1215	19.5		Não	06/05/2021	11:30:00	594	13.96		Não
04/03/2021	11:00:00	1242	11		Não	07/05/2021	11:30:00	74.8	39.2		Não
05/03/2021	12:30:00	1106	14.31		Não	10/05/2021	11:45:00	280	39.2		Não
08/03/2021	11:00:00	1095	12.08		Não	11/05/2021	14:30:00	133	155		Não
09/03/2021	11:00:00	970	14.5		Não	12/05/2021	14:30:00	281	31.9		Não
10/03/2021	14:30:00	928	12.67		Não	13/05/2021	14:30:00	81	16.55		Não
11/03/2021	11:00:00	967	13.17		Não	14/05/2021	11:30:00	234	28.8		Não
12/03/2021	11:30:00	877	12.94		Não	17/05/2021	11:30:00	108	26.4		Não
15/03/2021	11:00:00	1388	13.09		Não	18/10/2021	10:20:00	2752			Não
17/03/2021	16:00:00	1003	13.24		Não						