



CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Vítor Hugo Pfeifer Behling

**DIMENSIONAMENTO DE LEITO DE DRENAGEM PARA TRATAMENTO DE
RESÍDUOS DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA DO MUNICÍPIO DE
VERA CRUZ/RS.**

Santa Cruz do Sul

2026

Vítor Hugo Pfeifer Behling

**DIMENSIONAMENTO DE LEITO DE DRENAGEM PARA TRATAMENTO DE
RESÍDUOS DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA DO MUNICÍPIO DE
VERA CRUZ/RS.**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do curso de Engenharia Civil, do Departamento de Engenharia, Arquitetura e Ciências Agrárias, da Universidade de Santa Cruz do Sul – UNISC, Campus Santa Cruz do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em engenharia civil.

Orientador: Prof^a. Me. Bruno Toniolo Deprá

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e a toda a minha família, expresso a minha mais profunda e sincera gratidão. Vocês foram o meu porto seguro e o alicerce fundamental durante toda essa jornada. Agradeço por todo o apoio incondicional, pelo incentivo nas horas de incerteza e, acima de tudo, por terem abdicado de tantas coisas para tornar possível esta oportunidade de ensino na minha vida. Esta etapa concluída na engenharia não seria realidade sem o esforço, o amor e a confiança de vocês; esta conquista é, sem dúvida, nossa.

Ao meu orientador, Prof. Me. Bruno Deprá, meu muito obrigado. Agradeço imensamente pela paciência, pela abertura e pela disponibilidade constante ao longo de todo o desenvolvimento deste projeto. Sua dedicação em compartilhar seu conhecimento de forma tão generosa, suas orientações precisas e o tempo dedicado foram indispensáveis não apenas para a estruturação deste trabalho, mas também para o meu crescimento técnico e profissional.

Um agradecimento especial à Tanise Etges, responsável pela Estação de Tratamento de Água (ETA), e à Prefeitura Municipal de Vera Cruz. Agradeço imensamente pela confiança, pela disponibilidade em abrir as portas da unidade e por toda a colaboração prestada ao longo da pesquisa. O acesso às instalações e a troca de informações práticas foram essenciais para que este projeto saísse do papel e se conectasse com a realidade do saneamento municipal.

Aos colegas de curso que dividiram os desafios e as alegrias da vida acadêmica, e a todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para que eu chegasse até aqui, o meu sincero agradecimento.

RESUMO

O tratamento de água para abastecimento público gera como subproduto o lodo de ETA, um passivo ambiental classificado como resíduo sólido que exige disposição final adequada para evitar a degradação de corpos hídricos. No município de Vera Cruz/RS, a expansão da capacidade nominal da Estação de Tratamento de Água (ETA) central para 120 L/s tornou o manejo desses resíduos um desafio operacional para a proteção da sub-bacia do Arroio Andréas e do Rio Pardinho. Este trabalho tem como objetivo dimensionar um sistema de leitos de drenagem para o tratamento, desaguamento e secagem do lodo gerado na ETA de Vera Cruz, visando a adequação às normas ambientais e a viabilidade operacional do sistema. A pesquisa caracteriza-se como um estudo de caso de natureza aplicada e quantitativa, estruturada a partir da estimativa da produção de massa seca de lodo e da determinação geométrica do sistema de secagem. O projeto conceitual propõe a readequação física e a impermeabilização de duas antigas cavas de terra operando em regime de alternância, dimensionando uma área superficial total de filtração de aproximadamente 1.145 m², com ciclo operacional de 20 dias e taxa de aplicação de sólidos de 15 kg/m². A principal inovação tecnológica do projeto baseia-se na substituição do leito convencional de areia por mantas geotêxteis não tecidas atuando como meio filtrante sobre a camada de brita. A configuração com geossintéticos evita o fenômeno de colmatção e facilita a raspagem da torta de lodo seco, viabilizando uma recuperação de até 98% da água livre clarificada com retenção superior a 99% dos sólidos suspensos. Por fim, o dimensionamento proposto visa assegurar à unidade a estrita conformidade com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010) e a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 430/2011, além de promover o reuso hídrico e estabelecer um modelo técnico sustentável e de baixo custo operacional.

Palavras-chave: Lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA); Leitos de drenagem; Mantas geotêxteis / Geossintéticos; Desaguamento e desidratação de resíduos; Reuso hídrico; Política Nacional de Resíduos Sólidos.

ABSTRACT

The treatment of water for public supply generates Water Treatment Plant (WTP) sludge as a byproduct, an environmental liability classified as solid waste that requires proper final disposal to prevent the degradation of water bodies. In the municipality of Vera Cruz/RS, the expansion of the central Water Treatment Plant's (WTP) nominal capacity to 120 L/s has made the management of these residues a operational challenge for the protection of the Arroio Andréas and Rio Pardinho sub-basins. This study aims to size a drainage bed system for the treatment, dewatering, and drying of the sludge generated at the Vera Cruz WTP, aiming at compliance with environmental regulations and the operational viability of the system. The research is characterized as an applied and quantitative case study, structured upon the estimation of dry sludge mass production and the geometric determination of the drying system. The conceptual project proposes the physical retrofitting and waterproofing of two former earth pits operating in an alternating regime, sizing a total superficial filtration area of approximately 1,145 m², with an operational cycle of 20 days and a solids application rate of 15 kg/m². The project's main technological innovation is based on replacing the conventional sand bed with non-woven geotextile blankets acting as a filtering medium over the gravel layer. The geosynthetic configuration prevents the clogging phenomenon and facilitates the scraping of the dry sludge cake, enabling the recovery of up to 98% of the clarified free water with a retention rate of over 99% of suspended solids. Finally, the proposed sizing aims to ensure the unit's strict compliance with the National Solid Waste Policy (Law No. 12,305/2010) and National Environment Council (CONAMA) Resolution No. 430/2011, in addition to promoting water reuse and establishing a sustainable and low operational cost technical model.

Keywords: Water Treatment Plant (WTP) sludge; Drainage beds; Geotextiles / Geosynthetics; Sludge dewatering and drying; Water reuse; National Solid Waste Policy.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Unidades de floculação e decantação da ETA Central de Vera Cruz/RS, estruturas onde ocorre a principal geração contínua do lodo a ser desaguado.....	24
Figura 2 - Modelo Digital de Elevação (MDE) e mapa hipsométrico da sub-bacia hidrográfica do Arroio Andréas, principal manancial de captação da ETA de Vera Cruz/RS.....	25
Figura 3 - Visão panorâmica das instalações da Estação de Tratamento de Água (ETA) Central de Vera Cruz/RS, destacando a infraestrutura de tratamento e sua inserção no terreno.....	26
Figura 4 - Fluxograma do processo de tratamento de água da ETA Vera Cruz/RS, com destaque para as unidades operacionais geradoras de lodo (decantadores e lavagem de filtros).....	28
Figura 5 - Constatação in loco do estado de inoperância do sistema antigo, com vegetação densa superando a altura da baliza topográfica de referência.....	30
Figura 6 - Classificação e mecanismos de atuação dos geotêxteis, com destaque para as funções de filtração, separação e proteção utilizadas em sistemas de drenagem.....	33
Figura 7 - Vista aérea da ETA de Vera Cruz, com destaque para a área (cavas inoperantes com vegetação) destinada à futura construção dos leitos de drenagem.....	36
Figura 8 - Equipamento de topografia (Estação Total) posicionado na área de estudo para o mapeamento planialtimétrico das cavas inoperantes.....	39
Figura 9 - Operação da Estação Total e visada ao prisma refletor durante a coleta de dados topográficos, visualizando-se a infraestrutura da ETA Central ao fundo.....	40
Figura 10 - Detalhe interno da casa de filtros da Estação de Tratamento de Água de Vera Cruz/RS, evidenciando as baterias de filtração rápida.....	41
Figura 11 - Detalhe da fachada lateral do prédio operacional da ETA. A coluna sinalizada pelo retângulo vermelho abriga a tubulação de descida gravitacional existente, responsável por transportar o material da lavagem dos filtros em direção às cavas inoperantes.....	46

Figura 12 - Poço de Inspeção (PI) posicionado no trecho final do escoamento gravitacional, na interface entre o pátio da estação e a área de disposição das cavas inoperantes.....	46
Figura 13 - Corte transversal dimensionado da cama de filtração e drenagem, ilustrando as espessuras e a disposição dos materiais construtivos.....	49
Figura 14 - Estrutura de chegada de água bruta e câmara de mistura rápida da ETA Central, ponto designado para a reincorporação do efluente clarificado proveniente dos leitos de drenagem.....	52
Figura 15 - Delimitação da área de implantação proposta para os leitos de drenagem (destacada em amarelo), localizadas sobre as cavas inoperantes da ETA Vera Cruz/RS.....	59
Figura 16 - Layout operacional dos tanques de secagem de lodo e infraestrutura de rede de adução e drenagem.....	66
Figura 17 - Corte longitudinal demonstrando o perfil hidráulico entre as unidades (Câmara de Entrada, Tanque de Secagem e Poço de Sucção), com destaque para a declividade de fundo de 1,5\%.....	67
Figura 18 - Detalhamento construtivo em corte transversal: geometria do fundo, meios filtrantes e elementos de drenagem.....	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Caracterização pluviométrica e eventos extremos.....	55
Tabela 2 - Balanço Geométrico e Validação de Área do Projeto.....	61
Tabela 3 - Parâmetros Construtivos e Dimensionais de cada Leito de Drenagem.	62
Tabela 4 - Matriz de decisão tecnológica para o gerenciamento do lodo.....	70
Tabela 5 - Balanço Volumétrico e Logístico Comparativo.....	72
Tabela 6 – Orçamento Preliminar de Implantação (CAPEX).	74

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Distribuição populacional do município de Vera Cruz/RS, estratificada entre as zonas urbana e rural.	23
Gráfico 2 - Distribuição percentual da qualidade da água bruta captada no manancial Arroio Andréas no ano de 2017, evidenciando o enquadramento de 89% das amostras nas Classes 1 e 2.	26
Gráfico 3 - Redução de custo anual com produtos químicos na ETA de Vera Cruz após a implementação do Programa Protetor das Águas.	27
Gráfico 4 - Distribuição sazonal da pluviosidade na área de estudo, destacando a maior severidade de chuvas durante o período de inverno.	54
Gráfico 5 - Histórico da precipitação pluviométrica mensal no município de Vera Cruz/RS, compreendendo o período de junho de 2025 a junho de 2026.	55

LISTA DE ABREVIACÕES

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM – American Society for Testing and Materials

CAD – Computer Aided Design (Desenho Assistido por Computador)

CAPEX – Capital Expenditure (Custos de Implantação / Despesas de Capital)

CBR – California Bearing Ratio (Índice de Suporte Califórnia)

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

CONSEMA – Conselho Estadual do Meio Ambiente

EDM – Electronic Distance Measurement (Distanciômetro Eletrônico)

ETA – Estação de Tratamento de Água

FS – Fator de Segurança

GEE – Gases de Efeito Estufa

IDF – Intensidade-Duração-Frequência

LETA – Lodo de Estação de Tratamento de Água

MDT – Modelo Digital do Terreno

NBR – Norma Brasileira

NTU – Nephelometric Turbidity Unit (Unidade de Turbidez)

O95 – Abertura aparente de poros

OPEX – Operational Expenditure (Custos Operacionais / Despesas Operacionais)

PAC 1 – Programa de Aceleração do Crescimento 1

PBA – Ponta e Bolsa com Anel

PEAD – Polietileno de Alta Densidade

PET – Poliéster

PGRS – Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos

PI – Poço de Inspeção

PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos

PP – Polipropileno

PROSAB – Programa de Pesquisa em Saneamento Básico

PSA – Pagamento por Serviços Ambientais

PVC – Policloreto de Vinila

QGIS – Quantum Geographic Information System

REF – Resistência Específica à Filtração

SEMAE – Serviço Municipal de Água e Esgoto

SINAPI – Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil

SST – Sólidos Suspensos Totais

ST – Sólidos Totais

TAS – Taxa de Aplicação de Sólidos

Tc – Tempo de Ciclo

UNISC – Universidade de Santa Cruz do Sul

uT – Unidade de Turbidez

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	Questão da pesquisa.....	17
1.2	Objetivos.....	17
1.2.1	Objetivo geral.....	17
1.2.2	Objetivos específicos.....	17
1.3	Justificativa.....	18
1.3.1	Relevância Ambiental e Legal.....	19
1.3.2	Viabilidade Operacional e Econômica.....	20
1.3.3	Contribuição Técnica e Inovação.....	21
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	23
2.1	Introdução à estação de tratamento de água de Vera Cruz/RS.....	23
2.2	O Lodo de ETA como Resíduo Sólido e o Marco Legal.....	28
2.3	Caracterização e Desaguabilidade do Lodo.....	30
2.4	Tecnologia de Leitos de Drenagem.....	31
2.4.1	Drenagem Gravitacional (Fase Rápida):.....	31
2.4.2	Secagem por Evaporação e Retração (Fase Lenta):.....	32
2.5	Inovação com Mantas Geotêxteis (Geossintéticos).....	32
2.5.1	Altíssima Eficiência de Retenção e Qualidade do Drenado:.....	34
2.5.2	Otimização Logística e Vantagens Operacionais (OPEX):.....	34
2.6	Reuso Hídrico e Sustentabilidade Operacional.....	34
3	METODOLOGIA.....	36
3.1	Caracterização da pesquisa.....	36
3.1.1	Caracterização da Área de Estudo e Diagnóstico Atual.....	36
3.1.2	Levantamento Topográfico Cadastral e Processamento de Dados.....	38
3.2	Estimativa da Produção de Lodo.....	40
3.2.1	Cálculo do Volume de Lodo Úmido Gerado (Vi).....	43
3.3	Dimensionamento da Área e Volume dos Leitos de Drenagem.....	43

SUMÁRIO

3.4 Dimensionamento da Trincheira de Ancoragem Perimetral.	44
3.5 Arranjo Físico-Hidráulico de Adução dos Resíduos	45
3.6 Projeto Físico e Hidráulico do Leito de Drenagem	47
3.6.1 Regularização e Impermeabilização de Fundo.	48
3.6.2 Rede de Subdrenagem e Camadas de Suporte.....	48
3.6.3 O Meio Filtrante Geossintético e a Aplicação da Lei de Darcy.	49
3.6.4 Parâmetros Normativos para Especificação do Geossintético.	50
3.7 Avaliação Econômica e Orçamentação Preliminar	51
3.8 Diretrizes para o Reúso do Efluente Drenado	51
3.9 Dimensionamento Hidrológico e Volume de Amortecimento.	53
3.9.1 Validação Climática e Análise Pluviométrica Recente	54
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	57
4.1.1 Resultado do Volume de Lodo Úmido.....	57
4.1.2 Resultado da Área Superficial Total (Atotal)	58
4.2 Dimensionamento Geométrico Final e Validação Espacial	59
4.2.4 Resultado do Dimensionamento Hidrológico e Vazão de Pico	63
4.3 Dimensionamento Geotécnico e Estabilidade dos Taludes	64
4.4 Detalhamento do Arranjo Físico e Perfil Hidráulico	65
4.4.1 Resultado do Sistema de Ancoragem Perimetral (Trincheira).	68
4.4.2 Rampa de Acesso e Suporte de Carga.....	69
4.5 Estudo de Alternativas Tecnológicas para Desaguamento	69
4.5.1 Matriz de Decisão Multicritério.....	70
4.6 Gerenciamento Logístico e Destinação Final do Lodo Desidratado	71
4.6.1 Otimização do OPEX de Transporte (A Matemática do Frete)	71
4.6.2 Alternativas de Destinação e Valorização do Resíduo.....	73
4.7 Estimativa de Custos de Implantação (CAPEX).	74
5 CONCLUSÃO	75

	SUMÁRIO	
6. REFERÊNCIAS		77

1 INTRODUÇÃO

O tratamento de água para abastecimento público é uma atividade de infraestrutura essencial que, embora tenha como fim a potabilidade e a proteção da saúde coletiva, gera como subproduto um passivo ambiental complexo: o lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA). No município de Vera Cruz, Rio Grande do Sul, a recente expansão da capacidade nominal da ETA central para 120 L/s, associada à operação baseada na sub-bacia do Arroio Andréas, torna o manejo desses resíduos um desafio operacional prioritário. De acordo com as diretrizes da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305/2010, o lodo de ETA é categorizado formalmente como um resíduo sólido. Essa classificação legal, complementada pelos critérios de periculosidade da norma NBR 10.004 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2004), proíbe terminantemente o descarte in natura desses subprodutos em corpos hídricos superficiais, impondo aos prestadores de serviços de saneamento a responsabilidade jurídica e técnica de implantar sistemas voltados ao adensamento, desidratação e disposição final ambientalmente adequada.

O principal desafio técnico associado ao lodo de decantadores decorre do seu elevado teor de umidade, apresentando frequentemente uma concentração de sólidos suspensos totais inferior a 1% no seu estado natural. Além disso, a presença marcante de hidróxidos metálicos gelatinosos eleva a resistência específica do lodo à filtração, dificultando o desaguamento espontâneo. No cenário específico de Vera Cruz, as ações de preservação de mananciais promovidas pelo Programa Municipal de Pagamento Por Serviços Ambientais, o "Programa Protetor das Águas", resultaram em uma melhoria direta na qualidade da água bruta. Essa melhoria, especificamente a elevação do pH da água do manancial, viabilizou a substituição do tipo de coagulante utilizado na estação, gerando uma redução de aproximadamente 60% nos custos com o tratamento químico. Essa alteração técnica favorece a desidratabilidade do resíduo; contudo, episódios sazonais de elevada turbidez decorrentes de eventos pluviométricos ainda demandam uma infraestrutura de desaguamento robusta e flexível.

Diante disso, os leitos de drenagem despontam como uma das alternativas de concepção natural mais eficientes e sustentáveis economicamente para municípios de médio porte, caracterizando-se pelo baixo custo de implantação e simplicidade operacional. Conforme preconizado em investigações coordenadas pela rede do Programa de Pesquisa em Saneamento Básico (PROSAB) (REALI, 1999), a eficiência dessa tecnologia fundamenta-se estritamente em fenômenos físicos de filtração em meio poroso, drenagem profunda da água livre e evaporação superficial. A proposta técnica avaliada neste estudo consiste na inovação operacional dessas unidades por meio da substituição da camada convencional de areia por

mantas geotéxteis não tecidas, atuando como elemento filtrante sintético de alta precisão. Este arranjo visa adequar a ETA de Vera Cruz às normativas ambientais de forma definitiva, aliando segurança jurídica à eficiência operacional.

1.1 Questão da pesquisa

Como dimensionar um sistema de leitos de drenagem, considerando aspectos técnicos e geométricos, para promover o desaguamento adequado do lodo gerado na Estação de Tratamento de Água do município de Vera Cruz/RS?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Dimensionar um sistema de leitos de drenagem para o tratamento, desaguamento e secagem do lodo gerado nos processos da Estação de Tratamento de Água (ETA) do município de Vera Cruz/RS, visando a adequação às normas ambientais e a viabilidade operacional do manejo de resíduos da unidade.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- a) Caracterizar a geração de resíduos da ETA: Calcular o volume de água de lavagem dos filtros e estimar a produção diária de massa seca de lodo, considerando os parâmetros de vazão, turbidez da água bruta e a dosagem de coagulantes empregados na estação.
- b) Determinar os parâmetros geométricos do sistema, incluindo área necessária, volume útil, profundidade e inclinação de fundo das unidades, de modo a atender aos ciclos de descarga e à capacidade operacional da ETA.
- c) Especificar as camadas filtrantes e drenantes: Definir a configuração física estrutural, incluindo a estratificação da camada de suporte (brita), o dimensionamento da rede de tubulações (drenos) e a especificação de materiais sintéticos (manta geotêxtil) para otimização da percolação.
- d) Estabelecer diretrizes operacionais básicas: Propor um ciclo de operação e limpeza,

estimando o tempo de residência (secagem) do lodo no leito sob as condições climáticas da região, e propondo alternativas para o manejo da água drenada e do lodo desidratado.

1.3 Justificativa

A relevância técnica e científica deste estudo fundamenta-se na necessidade urgente de adequação das Estações de Tratamento de Água (ETAs) brasileiras às exigências legais de sustentabilidade, associada à busca por tecnologias de desidratação de resíduos que conciliem baixo custo operacional e elevada eficiência de deságue. No cenário do município de Vera Cruz/RS, esse panorama tornou-se ainda mais crítico após a expansão da capacidade nominal da ETA central para 120 L/s (SEMAE, 2021), o que elevou proporcionalmente o volume de lodo gerado nos decantadores e a frequência de lavagem dos filtros.

Sob a ótica ambiental e legal, a disposição inadequada desse subproduto é severamente restringida pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010), que o classifica como resíduo sólido, e pelas condições de lançamento de efluentes estabelecidas pela Resolução CONAMA nº 430/2011 (BRASIL, 2010; ORTIZ; KELLNER; ACHON, 2024). Sendo assim, a pesquisa justifica-se pela urgência em dotar a infraestrutura de saneamento local de um sistema que impeça o descarte in natura no meio ambiente e que permita a recuperação da fase líquida para reincorporação ao processo de tratamento, reduzindo as perdas volumétricas de água bruta na planta.

Do ponto de vista de engenharia e inovação tecnológica, embora os leitos de drenagem convencionais baseados em camadas de areia sejam consagrados por sua simplicidade e viabilidade econômica para municípios de médio porte (REALI, 1999), a substituição ou revestimento do meio filtrante por mantas geotêxteis não tecidas representa um avanço operacional significativo. O uso desse elemento sintético otimiza a taxa de filtração profunda e acelera a desidratação por evaporação superficial, mitigando problemas crônicos de colmatação do meio poroso e reduzindo o tempo de secagem da torta de lodo (SANTOS, 2014; ORTIZ; KELLNER; ACHON, 2024).

Por fim, a escolha do geotêxtil como objeto de dimensionamento específico justifica-se pelos excelentes índices experimentais de desempenho reportados na literatura técnica para a retenção de sólidos suspensos em resíduos de características coloidais complexas. Pesquisas correlatas indicam que sistemas configurados com mantas geotêxteis são capazes de assegurar uma eficiência de retenção de sólidos totais suspensos superior a 99% e uma recuperação da água livre próxima a 98% (SANTOS et al., 2021). Portanto, o dimensionamento proposto neste trabalho fornece subsídios práticos e replicáveis para a gestão pública local, demonstrando a

viabilidade de se implantar uma solução de engenharia de alto desempenho. Embora as políticas públicas locais voltadas à conservação de mananciais através do "Programa Protetor das Águas" tenham otimizado a qualidade da água bruta captada na sub-bacia do Arroio Andréas, resultando na possibilidade de substituição do coagulante e em uma redução de até 60% nos custos com produtos químicos na estação, cabe ressaltar que este é um programa focado estritamente na proteção e recuperação do manancial de abastecimento, não possuindo metas ecológicas de ação direta nas instalações da ETA. Sendo assim, o volume absoluto de sólidos retidos no tratamento ainda representa um passivo ambiental expressivo que a autarquia precisa gerenciar de forma independente.

1.3.1 Relevância Ambiental e Legal

Sob a ótica regulatória e de preservação dos recursos hídricos, o gerenciamento dos resíduos gerados no tratamento de água constitui uma obrigação legal e técnica incontornável para as empresas e autarquias de saneamento. No Brasil, o lodo produzido nos decantadores e nos processos de lavagem de filtros de ETAs é classificado formalmente como resíduo sólido de acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305/2010 (BRASIL, 2010; ORTIZ; KELLNER; ACHON, 2024). Adicionalmente, os critérios normativos da NBR 10.004 da Associação Brasileira de Normas Técnicas enquadram esse material como resíduo de Classe II (Não Perigosos), subdividido em Classe II A (Não Inertes), devido ao potencial de solubilização de constituintes químicos e orgânicos concentrados durante o processo de potabilização (ABNT, 2004; SANTOS et al., 2021). Essa definição jurídica proíbe o descarte in natura dessas substâncias diretamente em corpos receptores superficiais sem tratamento prévio, uma prática historicamente comum que provoca o assoreamento de rios, o aumento artificial da turbidez da água e a degradação biológica das comunidades bentônicas (CORDEIRO, 1999).

Portanto, a concepção de qualquer sistema de desidratação e disposição final deve assegurar estrita conformidade com as metas de lançamento de efluentes e padrões de qualidade dos corpos d'água vigentes, conforme regulamentado pela Resolução CONAMA nº 430/2011 (BRASIL, 2011; ORTIZ; KELLNER; ACHON, 2024). No contexto do município de Vera Cruz/RS, a urgência ambiental dessa infraestrutura acentuou-se após as intervenções de engenharia que expandiram a capacidade nominal da ETA central para 120 L/s (SEMAE, 2021). O incremento na vazão de operação provoca um aumento linear e proporcional na taxa de acumulação de lodo nos decantadores, exigindo descargas mais frequentes do resíduo coloidal. Embora as políticas públicas locais voltadas à conservação de mananciais através do programa "Protetor das Águas" tenham otimizado a qualidade da água bruta captada na sub-bacia do Arroio Andréas resultando em uma redução de até 60% no consumo de coagulantes químicos

na estação (SEMAE, 2021), o volume absoluto de sólidos retidos ainda representa um passivo ambiental expressivo que não pode ser negligenciado.

Assim o dimensionamento de um leito de drenagem revestido com manta geotêxtil justifica-se legal e ambientalmente por duas vertentes. Primeiro, atua na contenção física do material sólido disperso, impedindo o impacto poluidor direto na bacia hidrográfica local e atendendo às penalidades das legislações ambientais. Segundo, possibilita a recuperação de uma fração volumétrica de até 98% da água livre retida no lodo (SANTOS et al., 2021). O efluente líquido clarificado, ao ser coletado pela rede de subdrenagem inferior e reincorporado ao início do circuito de tratamento da ETA, mitiga o desperdício de água na planta, promovendo a ecoeficiência operacional e alinhando-se diretamente aos princípios de sustentabilidade hídrica defendidos no plano diretor do município.

1.3.2 Viabilidade Operacional e Econômica.

A seleção de uma tecnologia para a desidratação do lodo de ETA em municípios de médio porte deve conciliar, obrigatoriamente, a eficiência de remoção da fase líquida com a simplicidade operacional e a modicidade dos custos de implantação e manutenção. Sistemas mecanizados convencionais como centrífugas, prensas-filtro ou adensadores dinâmicos frequentemente apresentam restrições de viabilidade para ETA de menor escala devido ao elevado consumo de energia elétrica, necessidade de operadores altamente especializados e custo expressivo com peças de reposição e automação industrial (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2012). Nesses cenários, os sistemas naturais de desaguamento por gravidade despontam como soluções técnico-econômicas altamente atrativas. Historicamente, os leitos de secagem e drenagem convencionais utilizam uma camada superficial de areia fina sobre um meio suporte de brita graduada (REALI, 1999).

Contudo, sob a ótica operacional, os sistemas tradicionais apresentam limitações mecânicas e hidráulicas severas. A restrição operacional mais crítica ocorre durante a remoção mecânica ou manual da torta de lodo desidratada: durante a raspagem, inevitavelmente ocorre a perda de parte da camada de areia filtrante, exigindo reposições periódicas do material granulométrico e gerando interrupções frequentes no fluxo de operação da planta para manutenção.

Adicionalmente, as partículas coloidais do lodo tendem a penetrar nos interstícios dos grãos de areia, provocando o fenômeno de colmatação profunda, o que reduz drasticamente a

taxa de percolação ao longo dos ciclos e exige a lavagem ou substituição completa do meio poroso (SANTOS, 2014; ORTIZ; KELLNER; ACHON, 2024). A aplicação de mantas geotêxteis não tecidas como interface ou elemento filtrante principal mitiga de forma eficaz esta limitação estrutural.

Tecnicamente, a manta atua como uma barreira sintética de alta porosidade e abertura aparente de poros (O 95) controlada em fábrica, cuja permeabilidade obedece aos critérios hidráulicos da Lei de Darcy aplicados a meios porosos (SANTOS, 2014). Essa característica impede a penetração do material suspenso nas camadas inferiores de brita, retraindo os sólidos na superfície do geossintético. Operacionalmente, a flexibilidade e a resistência mecânica à tração da manta facilitam sobremaneira a etapa de limpeza e remoção da torta desidratada. A torta pode ser facilmente raspada ou recolhida sem que haja arraste de material filtrante, o que estende a vida útil do leito, minimiza o tempo de paralisação da unidade e reduz de forma drástica os custos com mão de obra operacional (KURODA et al., 2014; ORTIZ; KELLNER; ACHON, 2024).

Sob o aspecto econômico, embora o investimento inicial inclua a aquisição do material geossintético, a análise do ciclo de vida e dos custos operacionais (OPEX) demonstra o ganho financeiro da alternativa. Estudos experimentais em escala piloto apontam que leitos configurados com mantas não tecidas alcançam taxas de desaguamento aceleradas devido à otimização combinada da drenagem vertical profunda e da evaporação superficial, encurtando o tempo total de ciclo de secagem da torta em comparação aos leitos de areia convencionais sob as mesmas condições climáticas (SANTOS et al., 2021). Para a ETA de Vera Cruz, cujo horizonte de projeto lida com uma vazão nominal substancial de 120 L/s (SEMAE, 2021), essa aceleração do ciclo traduz-se na otimização da área física necessária para a implantação das lagoas ou tanques de deságue. Reduzindo a área superficial de projeto necessária, minimiza-se diretamente o custo de movimentação de terra, obras civis de concreto e impermeabilização de fundo, consolidando o leito de drenagem com geotêxtil como uma solução de engenharia de alta eficiência logística, baixo custo de manutenção e plena viabilidade econômica para a gestão do saneamento municipal.

1.3.3 Contribuição Técnica e Inovação.

A especificidade deste estudo reside na análise do impacto do programa "Protetor das Águas" na gestão de resíduos. A melhoria das características da água bruta possibilitou alterações operacionais no tratamento, resultando em uma redução aproximada de 60% nos custos relacionados aos produtos químicos utilizados na ETA, sugere a produção de um lodo

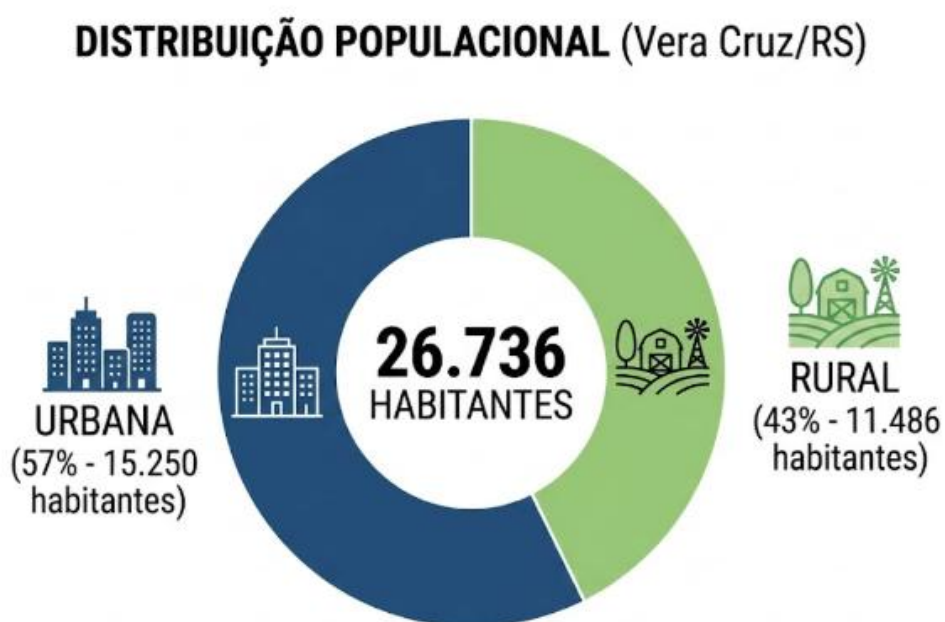
com características físico-químicas distintas, possivelmente mais apto a processos de desidratação natural. Além disso, a aplicação de geossintéticos (manta geotêxtil) no projeto conforme referenciado em pesquisas de ponta como o PROSAB representa uma modernização técnica que visa otimizar o tempo de secagem e a qualidade do efluente drenado, servindo como modelo técnico para outras estações de porte similar na região do Vale do Rio Pardo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Introdução à estação de tratamento de água de Vera Cruz/RS.

Localizado a 160 km de Porto Alegre, possui uma população de aproximadamente 26.736 habitantes (sendo 15.250 na área urbana e 11.486 na zona rural). O saneamento básico da cidade é gerido pelo Serviço Municipal de Água e Esgoto (SEMAE), que atende 100% da população através de uma rede que contempla 5.800 ligações urbanas e 3.550 rurais.

Gráfico 1 - Distribuição populacional do município de Vera Cruz/RS, estratificada entre as zonas urbana e rural.



Fonte: O autor (2026).

A Estação de Tratamento de Água (ETA) Central constitui a unidade fundamental de processamento do sistema de abastecimento. Originalmente projetada para uma vazão menor, a unidade passou por uma ampliação significativa através do Programa de Aceleração do Crescimento (PAC 1). Esse investimento permitiu a expansão do prédio, dos decantadores, filtros e laboratório, ampliando a capacidade nominal de tratamento de 45 L/s para 120 L/s.

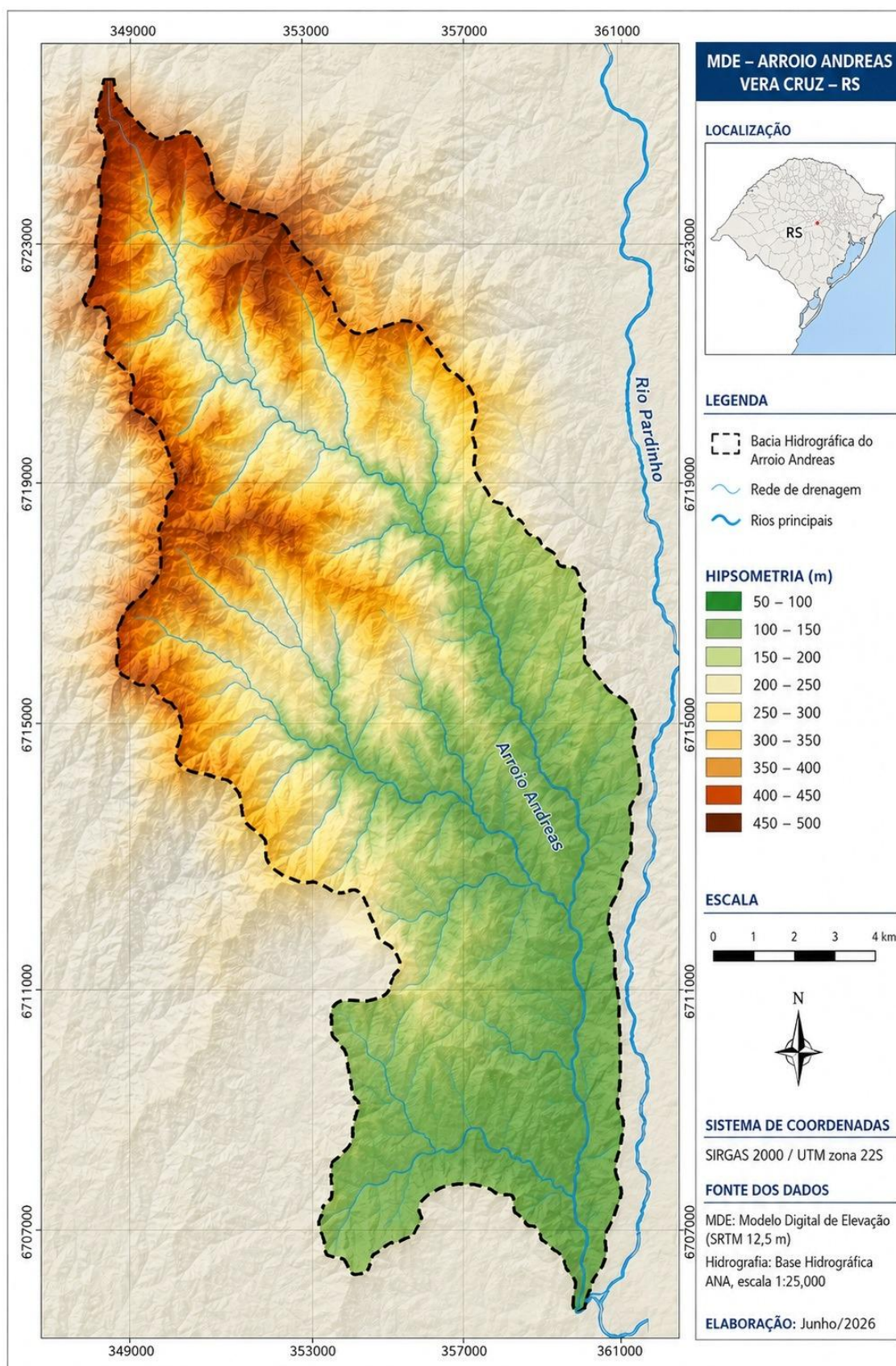
Figura 1 - Unidades de floculação e decantação da ETA Central de Vera Cruz/RS, estruturas onde ocorre a principal geração contínua do lodo a ser desaguado.



Fonte: O autor (2026).

Para garantir a segurança hídrica, a estação conta com quatro reservatórios que totalizam 3.500 m³ de capacidade (distribuídos em volumes de 2.500 m³, 500 m³, 350 m³ e 150 m³) e tecnologia de ponta, como o gerador de cloro instalado em 2013. Os mananciais principais de captação são as sub-bacias do Arroio Andréas e do Arroio Dona Josefa.

Figura 2 - Modelo Digital de Elevação (MDE) e mapa hipsométrico da sub-bacia hidrográfica do Arroio Andréas, principal manancial de captação da ETA de Vera Cruz/RS.



Fonte: O Autor (2026).

Figura 3 - Visão panorâmica das instalações da Estação de Tratamento de Água (ETA) Central de Vera Cruz/RS, destacando a infraestrutura de tratamento e sua inserção no terreno.



Fonte: O Autor (2026).

Este Programa de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) incentiva produtores rurais a recuperarem e preservarem nascentes e margens de arroios. O impacto positivo na qualidade da água bruta é direto. Segundo os dados levantados em 2017, 89% das amostras monitoradas foram classificadas nas Classes 1 e 2 (Resolução CONAMA nº 357/2005). A melhoria na preservação do manancial permitiu a substituição do produto químico utilizado, adotando-se o Policloreto de Alumínio (PAC) no processo de tratamento na ETA, gerando uma economia anual superior a R\$ 185 mil aos cofres públicos.

Gráfico 2 - Distribuição percentual da qualidade da água bruta captada no manancial Arroio Andréas no ano de 2017, evidenciando o enquadramento de 89% das amostras nas Classes 1 e 2.

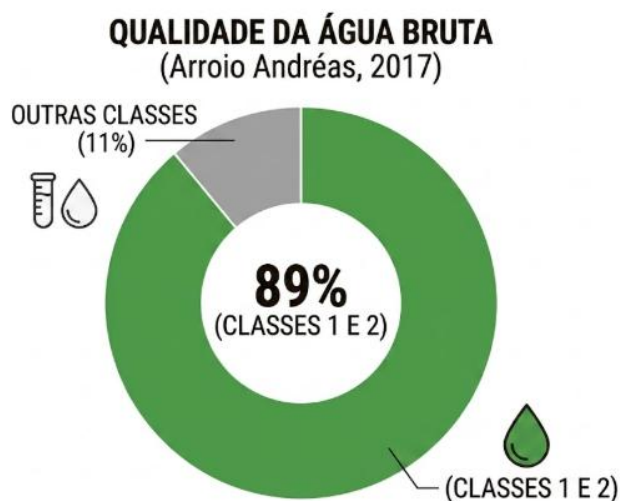


Gráfico 3 - Redução de custo anual com produtos químicos na ETA de Vera Cruz após a implementação do Programa Protetor das Águas.

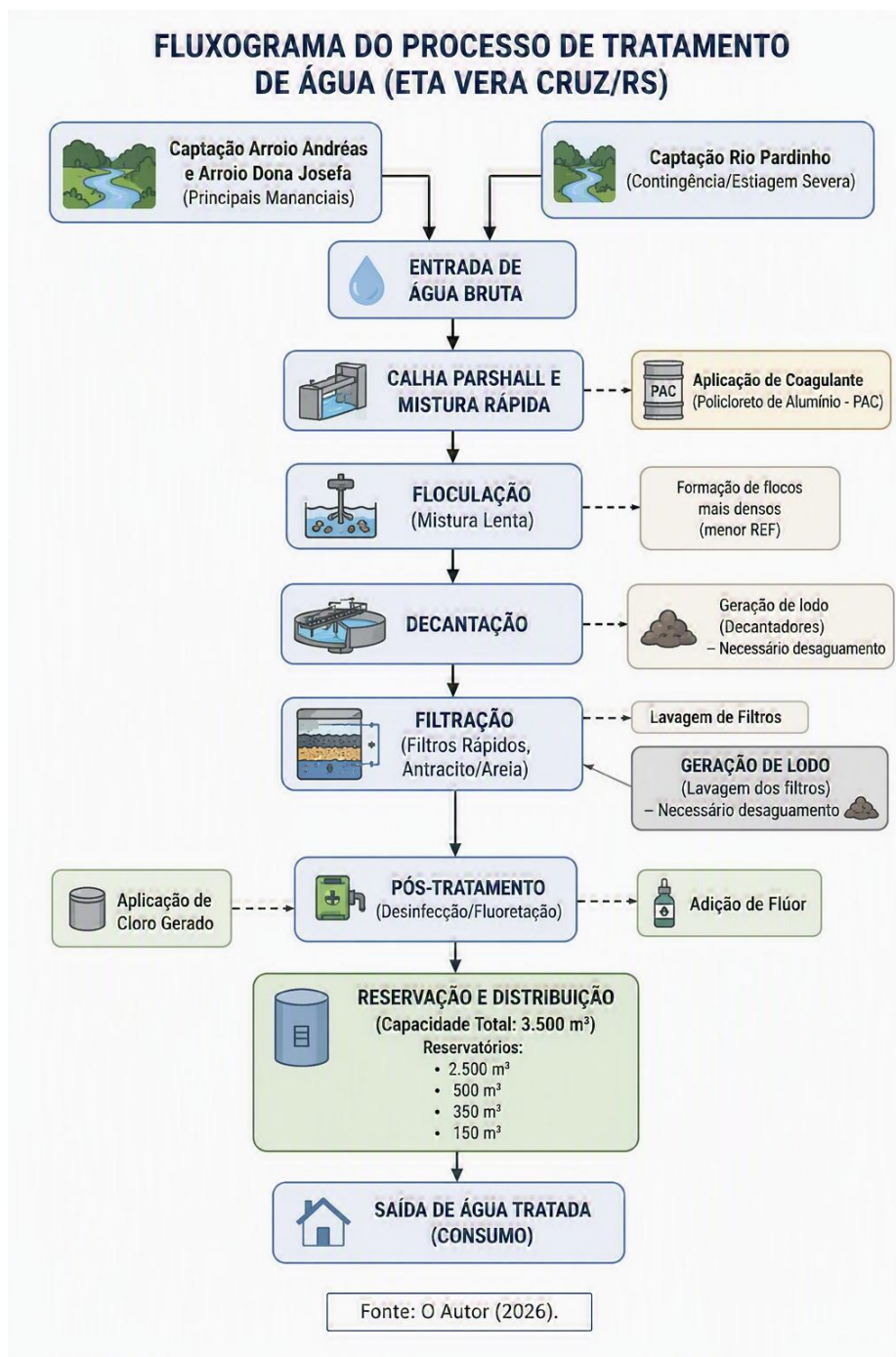


Fonte: O Autor (2026).

Embora o tratamento da água tenha atingido altos índices de eficiência e sustentabilidade ambiental, a operação de uma ETA de 120 L/s gera subprodutos contínuos, como o lodo resultante da decantação e da lavagem de filtros. Nesse contexto, a correta gestão desses resíduos torna-se o próximo passo fundamental para fechar o ciclo de sustentabilidade hídrica do município, justificando a necessidade de dimensionamento de sistemas eficientes de desaguamento, como os leitos de drenagem.

Para compreender a dinâmica de geração de resíduos na ETA Central de Vera Cruz/RS e subsidiar o dimensionamento dos leitos de drenagem, faz-se necessária a análise integrada dos processos unitários da planta. A Figura 4 ilustra o caminhamento da água, desde a captação superficial nos mananciais até a distribuição final, evidenciando os principais pontos de clarificação onde ocorre a concentração e a consequente purga das massas de lodo.

Figura 4 - Fluxograma do processo de tratamento de água da ETA Vera Cruz/RS, com destaque para as unidades operacionais geradoras de lodo (decantadores e lavagem de filtros).



Fonte: O Autor (2026).

2.2 O Lodo de ETA como Resíduo Sólido e o Marco Legal.

O subproduto gerado nas etapas de coagulação, floculação e decantação do processo de potabilização, denominado lodo de ETA, é classificado formalmente como resíduo sólido pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), sob a Lei nº 12.305/2010. Do ponto de vista da engenharia sanitária, essa classificação condiciona o gerenciamento do material a uma ordem

de prioridade focada na redução de volume, reúso e destinação final ambientalmente adequada. Conforme apontam Ortiz, Kellner e Achon (2024), o lodo em seu estado natural apresenta teores elevados de umidade, demandando uma etapa técnica de pré-condicionamento e desidratação para viabilizar economicamente o transporte e atender aos critérios técnicos de recebimento de aterros licenciados.

No contexto regional, o manejo desse resíduo deve mitigar os riscos de degradação de mananciais como o Arroio Dona Josefa e o Arroio Andréas. As diretrizes operacionais do projeto são balizadas pela Resolução CONAMA nº 430/2011, que estabelece padrões rígidos para o lançamento de efluentes em corpos hídricos superficiais através de limites restritivos para Sólidos Suspensos Totais (SST) e turbidez.

Essa regulamentação técnica fundamenta o emprego de sistemas de desaguamento de alta eficiência, a exemplo dos leitos de drenagem com mantas geotêxteis. Alinhadas às premissas do PROSAB (REALI, 1999), essas unidades atuam como uma barreira física que retém a fração sólida e os hidróxidos metálicos dos coagulantes, garantindo que o efluente drenado apresente carga poluidora mínima para o retorno ao ciclo de tratamento ou ao corpo receptor.

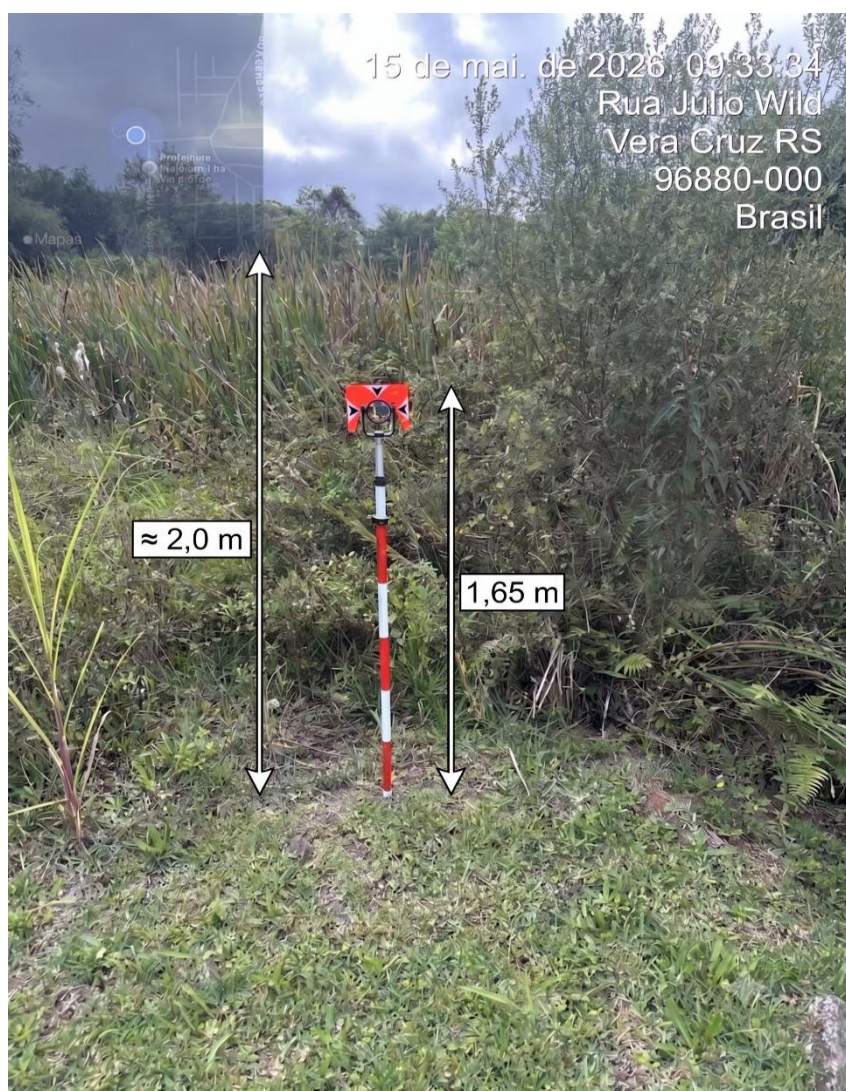
Adicionalmente, no âmbito estadual, a destinação final do lodo de ETA passou por uma modernização regulatória expressiva com a promulgação da Resolução do Conselho Estadual do Meio Ambiente (CONSEMA) nº 461/2022. Esta normativa gaúcha viabilizou o uso de Lodos de Estações de Tratamento de Água (LETAs) em solos, estabelecendo que, mediante adequado monitoramento e desidratação, o resíduo possui viabilidade técnica e legal para aplicação agrônômica, consolidando as práticas de economia circular no saneamento regional.

A necessidade de adequação a este rigor normativo torna-se evidente ao analisar o diagnóstico operacional do sistema de lodo preexistente na ETA Vera Cruz. As inspeções de campo confirmaram a inoperância do sistema original de desaguamento. As unidades, concebidas como leitos de secagem por gravidade, encontram-se atualmente em estado de abandono, com sua capacidade volumétrica totalmente comprometida pelo acúmulo histórico de lodo e pela proliferação de vegetação densa.

Para quantificar o grau de assoreamento e a perda de funcionalidade da estrutura, utilizou-se um prisma topográfico como referência de nível. A Figura 5 registra a situação atual encontrada, onde a vegetação invasora no interior dos leitos atinge cotas superiores a 2,0 metros em relação ao nível do terreno circundante, ultrapassando significativamente a altura da baliza de referência instalada a 1,65 m. Este cenário evidencia a falência hidráulica do sistema antigo e consolida a urgência do projeto de redimensionamento e readequação com geossintéticos

proposto neste trabalho.

Figura 5 - Constatação in loco do estado de inoperância do sistema antigo, com vegetação densa superando a altura da baliza topográfica de referência.



Fonte: O autor (2026).

2.3. Caracterização e Desaguabilidade do Lodo.

A natureza físico-química do lodo é uma variável dependente da qualidade da água bruta e da estequiometria dos coagulantes aplicados. Segundo Di Bernardo et al. (2012), a massa de sólidos secos (M_s) gerada em uma ETA é diretamente proporcional à dosagem de produtos químicos e à carga de turbidez removida. Em sistemas como o de Vera Cruz/RS, em sistemas como o de Vera Cruz/RS, o "Programa Protetor das Águas" exerce influência técnica direta no potencial de desaguamento do resíduo: ao conservar a bacia do Arroio Andréas, o programa reduz a variabilidade de sedimentos e o aumento do pH da água permitiu a otimização e troca

do coagulante para o Policloreto de Alumínio, reduzindo os custos operacionais. Esta modernização química é crucial, pois, conforme Ortiz, Kellner e Achon (2024), lodos com dosagens desequilibradas de hidróxidos metálicos tendem a formar estruturas coloidais gelatinosas que retêm a água intersticial com grande afinidade. Esta menor dependência de coagulantes metálicos é crucial, pois, conforme Ortiz, Kellner e Achon (2024), lodos com alta concentração de hidróxidos de alumínio ou ferro tendem a formar estruturas coloidais gelatinosas que retêm a água intersticial com grande afinidade, elevando a Resistência Específica à Filtração (REF).

O potencial de desaguamento consiste, portanto, na capacidade do lodo de liberar sua fase líquida, um processo que é otimizado quando a torta de lodo possui alta porosidade. A redução da carga química em Vera Cruz, aliada à possível aplicação de polímeros auxiliares, promove a formação de flocos mais densos e resistentes. De acordo com os estudos de Kuroda et al. (2014), presentes nas referências deste trabalho, a estrutura do floco determina o sucesso da drenagem gravitacional inicial no leito. Quando o lodo apresenta baixa REF, a água percola com maior velocidade pelas fibras da manta geotêxtil, acelerando a transição para a fase de secagem por evapotranspiração. Assim, a caracterização precisa da massa seca e do comportamento reológico do lodo da ETA de Vera Cruz é o que permite dimensionar um sistema que não apenas armazene o resíduo, mas que efetivamente promova a separação sólido-líquido de forma acelerada, garantindo a eficiência operacional da unidade.

2.4. Tecnologia de Leitos de Drenagem.

A concepção tecnológica dos leitos de drenagem fundamenta-se na separação sólido-líquido através de mecanismos físicos naturais, dispensando o uso de energia mecânica intensiva (como ocorre em centrífugas ou filtros-prensa). Essa característica confere ao sistema uma viabilidade econômica favorável, configurando-se como uma alternativa tecnicamente viável de baixo custo de implantação e operação (do inglês Capital Expenditure - CAPEX, e Operational Expenditure - OPEX) para autarquias e estações de médio porte, como a unidade de 120 L/s de Vera Cruz. De acordo com as diretrizes consolidadas na literatura clássica e em investigações recentes, a transição do lodo do estado líquido para uma "torta" sólida e estável ocorre através de duas etapas cinéticas e operacionais distintas (REALI, 1999; ORTIZ; KELLNER; ACHON, 2024).

2.4.1 Drenagem Gravitacional (Fase Rápida):

Esta etapa inicia-se imediatamente após a descarga do lodo úmido sobre o leito.

Impulsionada pelo gradiente hidráulico, a "água livre", ou seja, a fração líquida que não está retida nas forças capilares ou na estrutura química dos flocos, percola através do meio filtrante em direção ao sistema de subdrenagem. A eficiência e a velocidade desta fase são ditadas pela permeabilidade da interface de suporte. Devido à ausência de parâmetros geométricos específicos para leitos de lodo na norma de projeto de ETAs (ABNT NBR 12.216:1992), a conformação estrutural e as diretrizes de condutividade hidráulica do meio drenante adotadas neste estudo baseiam-se, por analogia construtiva, nas recomendações da ABNT NBR 12.209:2011, que padroniza os sistemas de desaguamento na engenharia sanitária. A manutenção de uma alta condutividade hidráulica neste estágio inicial é um fator determinante; por isso, a especificação de materiais que evitem a colmatção (obstrução dos interstícios por partículas finas do lodo) é fundamental para garantir que o volume máximo de água seja retirado nas primeiras horas ou dias do ciclo operacional.

2.4.2 Secagem por Evaporação e Retração (Fase Lenta):

Uma vez cessada a drenagem da água livre, o processo passa a ser dominado pela remoção da umidade capilar e celular, tornando-se estritamente dependente de fatores climáticos locais, como a incidência de radiação solar, a temperatura, a umidade relativa do ar e a velocidade dos ventos na região. Conforme descrito por Santos et al. (2014), à medida que a água é transferida para a atmosfera, a massa de lodo sofre uma drástica retração volumétrica. Este estresse mecânico na matriz do resíduo promove a formação de fissuras de contração ao longo da torta de lodo. A fissuração não é apenas um indicativo visual de secagem, mas um mecanismo termodinâmico essencial: as fendas rompem a crosta superficial ressecada, funcionando como canais de aeração que expõem as camadas inferiores e úmidas do lodo à ação do vento e do sol, maximizando a área de contato e acelerando exponencialmente a perda de umidade até que o resíduo atinja o teor de sólidos ideal para remoção e descarte seguro.

2.5. Inovação com Mantas Geotêxteis (Geossintéticos).

A concepção tradicional de leitos de drenagem preconiza a utilização de uma espessa camada de areia como meio filtrante superficial. No entanto, a prática operacional demonstra que essa configuração impõe severas limitações a médio prazo, notadamente a colmatção progressiva dos interstícios da areia pela penetração de partículas finas e coloidais do lodo. A substituição ou o recobrimento deste estrato por geossintéticos representa uma evolução tecnológica na engenharia sanitária. Cumpre destacar que os geotêxteis são geossintéticos técnicos permeáveis, utilizados primariamente para funções de separação, filtração e proteção

mecânica em projetos de infraestrutura. Em contrapartida, outras famílias de geossintéticos exercem funções distintas, como as geomembranas (utilizadas para impermeabilizar), os geocompostos (para drenar) e as geogrelhas (para reforçar o solo). Para compreender a magnitude dessa evolução no desaguamento de lodos, faz-se necessário o entendimento das multifunções que esses polímeros industrializados oferecem.

Figura 6 - Classificação e mecanismos de atuação dos geotêxteis, com destaque para as funções de filtração, separação e proteção utilizadas em sistemas de drenagem.



Fonte: O Autor (2026).

Conforme ilustrado na Figura 6, dentre as diversas aplicações possíveis, o presente projeto apropria-se prioritariamente das funções de Filtração e Proteção. As mantas do tipo Não Tecidas (agulhadas) retêm as partículas sólidas em suspensão, permitindo a passagem livre do líquido clarificado. Adicionalmente, o geotêxtil atua como um colchão antipuncionamento, resguardando a geomembrana impermeabilizante de base contra danos mecânicos gerados pelo meio suporte (brita) e pelo maquinário de limpeza.

Conforme evidenciado por Dalmazio (2017) em seu estudo de dimensionamento para a ETA de Itaúnas/ES, o geossintético atua simultaneamente como um elemento separador estrutural e um filtro de alta precisão. A sua matriz de fibras poliméricas impede a migração dos sólidos finos para as camadas inferiores de suporte (brita e tubulação de drenagem), garantindo a longevidade hidráulica do sistema e eliminando a necessidade de retro lavagens constantes do leito.

A viabilidade técnica desta alternativa consolida-se através de dois pilares fundamentais para o projeto:

2.5.1 Altíssima Eficiência de Retenção e Qualidade do Drenado:

O mecanismo de filtração em geossintéticos é otimizado pela própria massa de lodo, que, ao se depositar sobre a manta, forma uma "pré-capa" filtrante. Esta dupla barreira (lodo e manta) impede o carreamento de particulados. Estudos empíricos de Santos et al. (2021), aplicados à ETA de Ouro Branco/MG, comprovam que o uso de mantas geotêxteis viabiliza uma recuperação de até 98% da água livre presente no lodo, alcançando uma retenção de sólidos suspensos totais (SST) superior a 99%. Para a realidade de Vera Cruz, este grau de clarificação é o que assegura que o efluente drenado atenda aos rigorosos limites da Resolução CONAMA nº 430/2011, permitindo o seu bombeamento seguro de volta ao início do processo de potabilização (mistura rápida) sem comprometer a estabilidade físico-química da estação.

2.5.2 Otimização Logística e Vantagens Operacionais (OPEX).

A principal vulnerabilidade operacional dos leitos de areia manifesta-se durante a etapa de raspagem do lodo desidratado, operação que inevitavelmente remove parte da areia filtrante, exigindo reposições frequentes e encarecendo os Custos Operacionais (OPEX). A transição para a manta geotêxtil resolve esse passivo mecânico: a superfície sintética atua como uma interface antiaderente e resistente, facilitando o destacamento da torta seca e permitindo até mesmo o uso de maquinário leve para a remoção mecânica. Essa agilidade reduz drasticamente o tempo de inatividade (parada) da câmara de secagem. Consequentemente, o sistema adquire a capacidade de operar com Taxas de Aplicação de Sólidos (TAS) significativamente mais elevadas. Em termos práticos, isso significa que a ETA de Vera Cruz poderá processar um volume maior de lodo utilizando uma área construída menor, maximizando o custo-benefício da obra de infraestrutura proposta neste projeto.

2.6. Reuso Hídrico e Sustentabilidade Operacional.

A fase líquida resultante do processo de desaguamento tecnicamente denominada efluente drenado ou água clarificada deixa de ser um passivo ambiental para se tornar um recurso hídrico de alto valor agregado para a estação. Na configuração com geossintéticos, a qualidade físico-química deste efluente (especialmente em parâmetros de turbidez e cor aparente) frequentemente supera a da própria água bruta captada nos mananciais. Este alto grau de pureza ocorre devido ao sinergismo entre a retenção mecânica da manta geotêxtil e o fenômeno hidráulico de filtração em "pré-capa" (ou pre-coat). À medida que o lodo decanta sobre o geossintético, a própria matriz de partículas sólidas forma um meio poroso adicional

que atua como um filtro de profundidade, retendo coloides e impurezas ultrafinas antes mesmo que a água atinja a manta.

Conforme demonstrado nos estudos empíricos de Santos et al. (2021), o bombeamento de retorno desse efluente clarificado ao início do processo de tratamento (etapa de mistura rápida) converte a ETA em um sistema de circuito fechado (zero liquid discharge parcial). Para a realidade de Vera Cruz/RS, essa recirculação otimiza significativamente o balanço hídrico da unidade: ao recuperar a água que antes era desperdiçada junto ao lodo, reduz-se o volume total que precisa ser captado no Arroio Andréas. Consequentemente, obtém-se uma redução direta no consumo de energia elétrica das bombas de captação e, possivelmente, uma economia no consumo de alcalinizantes e coagulantes, visto que a água de reuso já possui estabilidade química.

Do ponto de vista regulatório e ambiental, o confinamento e o reuso dessa água reduzem drasticamente a pressão e o risco de impacto ambiental sobre os corpos receptores locais, como o Rio Pardinho. Esta abordagem holística não apenas blindar a autarquia contra as sanções previstas na Resolução CONAMA nº 430/2011, mas também se alinha de forma estrita aos princípios de ecoeficiência da engenharia sanitária contemporânea e às diretrizes de projeto da ABNT NBR 12216:1992, a qual preconiza a maximização do aproveitamento hídrico e a minimização de perdas operacionais nas instalações de potabilização.

3 METODOLOGIA

3.1 Caracterização da pesquisa

A presente pesquisa classifica-se como um estudo de caso de natureza aplicada e quantitativa. O objetivo central é o desenvolvimento de um projeto conceitual e executivo para o sistema de desaguamento da Estação de Tratamento de Água (ETA) do município de Vera Cruz/RS. O roteiro metodológico foi estruturado em cinco etapas consecutivas, baseando-se em normativas da ABNT e nos parâmetros empíricos consagrados pelo PROSAB (REALI, 1999) e por Di Bernardo et al. (2012).

3.1.1. Caracterização da Área de Estudo e Diagnóstico Atual.

O local previsto para a implantação do novo sistema de leitos de drenagem situa-se na área contígua às instalações operacionais da ETA. Levantamentos aéreos recentes evidenciam a presença de duas bacias escavadas diretamente em solo natural, utilizadas como lagoas de disposição para o lodo dos decantadores e para a água de lavagem dos filtros. Inspeções visuais e análises estruturais demonstram que essas cavas de terra não possuem impermeabilização de fundo ou sistema de contenção lateral projetado, encontrando-se atualmente inoperantes e com presença de vegetação.

Figura 7 - Vista aérea da ETA de Vera Cruz, com destaque para a área (cavas inoperantes com vegetação) destinada à futura construção dos leitos de drenagem.



Fonte: O Autor (2026).

A disposição de lodo diretamente sobre o solo natural, associada à perda de volume útil pela presença de vegetação, contraria as diretrizes da Política Nacional de Resíduos Sólidos

(Lei nº 12.305/2010) e as metas de adequação ambiental estabelecidas pelo Novo Marco Legal do Saneamento Básico (Lei nº 14.026/2020). No que tange à destinação final, a legislação federal proíbe o descarte de resíduos sem o devido tratamento prévio. Além da desconformidade legal, essa configuração compromete os preceitos contemporâneos da engenharia sanitária. A ausência de impermeabilização nas bacias escavadas agrava-se pelo fato de o lodo de ETA ser enquadrado como resíduo de Classe II A (Não Inertes), caracterizado por apresentar propriedades de solubilidade em água (ABNT, 2004). Logo, o contato contínuo desse material com o solo exposto representa risco de lixiviação de compostos químicos e percolação de contaminantes para o lençol freático, configurando um passivo ambiental incompatível com a ótica regulatória atual (ORTIZ; KELLNER; ACHON, 2024).

Este diagnóstico ambiental atua diretamente como fator condicionante na metodologia de dimensionamento do novo sistema. As inconformidades identificadas determinam a necessidade de intervenção estrutural dividida em três etapas de projeto: a movimentação de terra para limpeza e regularização geométrica do fundo das cavas, visando recuperar a capacidade volumétrica útil; a especificação técnica de uma barreira estanque com geomembrana de PEAD, destinada a neutralizar o processo de infiltração no solo; e o cálculo da área superficial ativa de filtração necessária para processar de forma segura a carga de sólidos gerada na estação.

Na sequência do roteiro técnico, os procedimentos metodológicos abrangem o detalhamento construtivo da rede de subdrenagem inferior e a especificação de mantas geotêxteis não tecidas sobre o meio poroso. O arranjo físico e os critérios de dimensionamento desses dispositivos são estruturados para atender às exigências de lançamento de efluentes da Resolução CONAMA nº 430/2011, orientando a coleta e o posterior direcionamento do líquido percolado. Assim, as etapas de projeto delimitam a regularização topográfica, a impermeabilização de fundo e o fluxo hidráulico necessários para a readequação das cavas de secagem.

3.1.2 Levantamento Topográfico Cadastral e Processamento de Dados.

Para que o redimensionamento volumétrico e a estabilidade geotécnica dos leitos fossem calculados com exatidão, a obtenção precisa da geometria atual das cavas e das cotas de fundo fez-se indispensável. Esta etapa de campo foi executada por meio de um levantamento planialtimétrico cadastral, utilizando uma Estação Total. A Estação Total é um instrumento eletro-ótico de alta precisão, fundamental na engenharia civil, concebido pela integração de um teodolito eletrônico com um distanciômetro eletrônico (Electronic Distance Measurement - EDM) (BORGES, 2013; REGINATO; ZIMMERMANN, 2024). O princípio de funcionamento do equipamento baseia-se na emissão de um feixe de luz infravermelha ou laser em direção a um prisma refletor posicionado nos vértices do terreno. O distanciômetro calcula a distância inclinada medindo o tempo de trânsito do sinal refletido.

Simultaneamente, os sensores angulares do teodolito eletrônico realizam a leitura dos ângulos horizontais (azimutes) e verticais (ângulos zenitais). O microprocessador interno da Estação Total correlaciona instantaneamente essas três variáveis através de princípios trigonométricos espaciais, convertendo o vetor de visada em coordenadas cartesianas tridimensionais relativas à estação de referência. Conforme apontam publicações recentes sobre levantamentos altimétricos e modelagem de superfícies para obras de infraestrutura (REGINATO; ZIMMERMANN, 2024), a automação desse processo de coleta e a posterior exportação da caderneta digital garantem a fidelidade geométrica indispensável para a elaboração do projeto executivo.

Figura 8 - Equipamento de topografia (Estação Total) posicionado na área de estudo para o mapeamento planialtimétrico das cavas inoperantes.



Fonte: O Autor (2026).

Durante o levantamento das estruturas da ETA Central, a varredura gerou uma nuvem de pontos caracterizada por coordenadas E (Easting / Eixo X), N (Northing / Eixo Y) e Z (Cota altimétrica). Os dados rastreados, incluindo o polígono das lagoas inoperantes, a malha de tubulações e os eixos das vias de acesso, foram armazenados na memória interna do equipamento em formato de texto estruturado.

Figura 9 - Operação da Estação Total e visada ao prisma refletor durante a coleta de dados topográficos, visualizando-se a infraestrutura da ETA Central ao fundo.



Fonte: O Autor (2026).

A metodologia de processamento consistiu na exportação dessa caderneta eletrônica para plataformas de Desenho Assistido por Computador (CAD). Neste ambiente virtual, a interpolação das cotas Z permitiu a modelagem de um Modelo Digital do Terreno (MDT) rigoroso (SILVA; SEGANTINE, 2015), possibilitando a extração exata das áreas superficiais úteis e subsidiando o cálculo dos volumes de movimentação de terra exigidos para a adequação dos taludes.

A caderneta eletrônica bruta contendo as coordenadas espaciais (E, N, Z) de todos os vértices irradiados durante a varredura da Estação Total, incluindo a rede de adução, vias de acesso e o polígono das cavas inoperantes, encontra-se detalhada no Apêndice A deste documento, garantindo a total rastreabilidade dos dados que embasaram a modelagem do terreno."

3.2. Estimativa da Produção de Lodo.

Figura 10 - Detalhe interno da casa de filtros da Estação de Tratamento de Água de Vera Cruz/RS, evidenciando as baterias de filtração rápida.



Fonte: O Autor (2026).

O dimensionamento de sistemas de desaguamento exige o conhecimento prévio da carga de sólidos gerada diariamente na estação. Diante da indisponibilidade de um banco de dados histórico contínuo com as análises diárias de turbidez da água bruta e das dosagens exatas de coagulante aplicadas na ETA em estudo, a quantificação da massa de lodo foi realizada por meio de modelos matemáticos empíricos e parâmetros conservadores de literatura, garantindo um fator de segurança adequado ao projeto executivo. A massa de sólidos secos gerada no processo de potabilização é oriunda de duas fontes principais: os sólidos em suspensão naturalmente presentes na água bruta e os sólidos precipitados resultantes da hidrólise do coagulante químico. Estes sólidos acumulam-se no fundo dos decantadores e ficam retidos no meio poroso (areia/antracito) das baterias de filtração rápida (Figura 10). A rotina de retrolavagem destas unidades operacionais gera um volume intermitente de água residuária com alta concentração de sólidos, que compõe ativamente a carga mássica a ser desidratada nos leitos de drenagem.

Para a estimativa da taxa de produção de sólidos secos (T_s), expressa em gramas de sólidos por metro cúbico de água tratada (g/m^3), adotou-se a equação consagrada na engenharia

sanitária, descrita por Reali (1999, p. 32) a partir das formulações empíricas de Kawamura (1991):

$$Ms = Q \times [(1,5 \times Tu) + (K \times D)] \times 10^{-3} \quad (1)$$

Em que:

Ms = Massa de sólidos secos gerada (kg/dia);

Q = Vazão de água tratada (m³/dia);

Tu = Turbidez média da água bruta (uT ou NTU), adotada como uma aproximação para os sólidos suspensos;

1,5 = Fator empírico de conversão de turbidez para sólidos em suspensão;

K = Coeficiente estequiométrico inerente ao produto químico (adota-se 0,20 para o Policloreto de Alumínio - PAC, valor representativo que reflete a menor geração de lodo químico deste polímero em relação ao sulfato tradicional);

D = Dosagem média do coagulante metálico aplicado (mg/L);

10^{-3} = Fator de conversão de gramas para quilogramas. Em que:

Para a aplicação desta formulação teórica, os parâmetros operacionais de projeto foram definidos com base na capacidade instalada da unidade e em cenários de segurança. A vazão de projeto (Q) corresponde à capacidade nominal máxima da estação ampliada, que é de 120 L/s (convertida para a base diária). A turbidez da água bruta (Tu) e a dosagem de coagulante (D) foram estipuladas com base nos picos de geração observados durante os meses de elevada pluviosidade na sub-bacia do Arroio Andréas. A adoção de valores majorados (cenário operacional adverso) garante que a área superficial dimensionada possua um coeficiente de segurança satisfatório, prevenindo o transbordamento ou o colapso hidráulico do sistema durante eventos climáticos extremos. A aplicação algébrica destes parâmetros para a definição da massa e do volume de lodo úmido a ser tratado será apresentada no capítulo de resultados e discussões deste trabalho.

3.2.1 Cálculo do Volume de Lodo Úmido Gerado (V_i).

A partir da determinação da massa seca, a metodologia requer a conversão deste valor para o volume físico ocupado pelo resíduo no estado líquido (V_i) antes do desaguamento. A formulação matemática, também baseada em parâmetros teóricos em detrimento de dados locais inexistentes, considera a concentração volumétrica e o peso específico do material:

$$V_i = \frac{M_s}{\gamma \times \left(\frac{C}{100}\right)} \quad (2)$$

Em que:

V_i = Volume diário de lodo úmido encaminhado aos leitos (m^3/dia);

γ = Peso específico do resíduo (1.010 kg/m^3);

C = Concentração de sólidos de fundo do decantador (adotado 1,0 %).

A adoção destas formulações empíricas e a escolha de valores majorados visa contemplar o percentil 95 (P95) da turbidez e os picos sazonais de geração de lodo que ocorrem durante os meses de elevada pluviosidade na sub-bacia do Arroio Andréas. A simulação deste cenário operacional limitante, que combina a maior carga de sólidos com a menor taxa de evaporação no inverno gaúcho, garantirá que a área superficial dimensionada possua um coeficiente de segurança (FS) adequado. Essa margem previne o transbordamento ou o colapso hidráulico do sistema durante eventos climáticos extremos. A aplicação algébrica destes parâmetros será apresentada no capítulo de resultados deste trabalho.

3.3. Dimensionamento da Área e Volume dos Leitos de Drenagem.

Com o valor de M_s definido, o dimensionamento geométrico será guiado pela Taxa de Aplicação de Sólidos (TAS) e pelo ciclo de operação. Por se tratar de um sistema otimizado com mantas geotêxteis, a TAS admitida por ciclo varia tipicamente entre 15 e 25 kg/m^2 , valores superiores aos leitos de areia convencionais.

A área superficial total necessária (A_{total}) será calculada por:

(3)

$$A_{total} = \frac{(M_s \times T_c)}{TAS}$$

Em que:

A_{total} : área total;

Carga Mássica Diária (M_s): Carga mássica diária gerada na estação (kg/dia em base seca);

T_c : Tempo do ciclo operacional (dias);

Taxa de Aplicação de Sólidos (TAS): Taxa de Aplicação de Sólidos admissível pelo material (kg/m² por ciclo).

Para o dimensionamento do sistema em estudo, adotou-se um ciclo operacional conservador de 20 dias (englobando as fases de aplicação, drenagem da água livre, evaporação superficial e raspagem da torta de lodo) e uma TAS de 15 kg/m² por ciclo, caracterizando um valor otimizado e seguro para o uso de geossintéticos.

Para garantir a redundância e a continuidade operacional da ETA, a área total deverá ser dividida em múltiplas câmaras (sendo N igual ou maior que 2). A geometria de cada câmara será definida para facilitar a operação de limpeza, adotando-se larguras compatíveis com o raio de giro ou a pá de minicarregadeiras, e profundidades úteis calculadas em função do teor de sólidos do lodo afluente (geralmente em torno de 1%).

3.4 Dimensionamento da Trincheira de Ancoragem Perimetral.

O confinamento de mantas geossintéticas no interior de escavações requer um sistema de fixação mecânica no topo dos taludes. Sem essa ancoragem, a geomembrana e o geotêxtil sucumbiriam às forças de arrancamento (pullout forces) geradas pelo peso do lodo úmido que traciona o material em direção ao fundo do leito (KOERNER, 2012).

O dimensionamento da trincheira de ancoragem baseia-se no equilíbrio de forças atuantes na crista do talude. Para que o sistema seja estável, a força de resistência ao atrito gerada na interface entre o solo e o geossintético (F_{res}) deve ser superior à tensão de arrancamento mobilizada (T_{mob}). A metodologia de cálculo estabelece que a geometria da vala

deve garantir um Fator de Segurança (FS) mínimo, expresso pela seguinte relação:

$$FS = \frac{\sum F_{res}}{T_{mob}} \quad (4)$$

Em que a força resistente total ($\sum F_{res}$) é diretamente proporcional ao comprimento de ancoragem (L_{anc}), à tensão vertical gerada pelo peso do solo de reaterro da vala ($\sigma_v = \gamma \cdot z$) e ao ângulo de atrito de interface entre o solo e o polímero (δ). Dessa forma, a largura, a profundidade e o recuo da trincheira serão definidos nos resultados do projeto para assegurar que a pressão de confinamento anule os riscos de deslizamento da manta durante a operação de desaguamento e raspagem.

3.5 Arranjo Físico-Hidráulico de Adução dos Resíduos

O transporte do resíduo gerado nas unidades de tratamento até o sistema de desaguamento ocorre por gravidade. Conforme ilustrado na Figura 8, a tubulação existente responsável por conduzir o material proveniente da lavagem dos filtros e as descargas dos decantadores desce acoplada à fachada lateral do prédio operacional. Esta rede de adução encontra-se protegida no interior da coluna estrutural destacada pelo retângulo vermelho. A partir da base desta prumada de descida, o efluente líquido é direcionado de forma subterrânea até a área de disposição, onde se encontram as cavas inoperantes.

Figura 11 - Detalhe da fachada lateral do prédio operacional da ETA. A coluna sinalizada pelo retângulo vermelho abriga a tubulação de descida gravitacional existente, responsável por transportar o material da lavagem dos filtros em direção às cavas inoperantes.



Fonte: O Autor (2026).

Figura 12 - Poço de Inspeção (PI) posicionado no trecho final do escoamento gravitacional, na interface entre o pátio da estação e a área de disposição das

cavas inoperantes.



Fonte: O Autor (2026).

O projeto de infraestruturas gravitacionais para o transporte de resíduos de ETA exige o rigoroso controle das condições hidráulicas do escoamento. O dimensionamento deve garantir uma declividade que proporcione velocidade autolimpante (usualmente superior a 0,60 m/s), evitando a sedimentação prematura das frações minerais pesadas no interior da rede, sem atingir velocidades excessivas que agravem o desgaste por abrasão mecânica.

Nesse contexto, para assegurar a longevidade e a eficiência hidráulica da linha de esgotamento rumo aos novos leitos de drenagem propostos, a infraestrutura deve ser concebida em materiais poliméricos, como o Polietileno de Alta Densidade (PEAD) ou o PVC PBA (Ponta e Bolsa com Anel). O baixo coeficiente de rugosidade interna desses materiais otimiza o escoamento por gravidade, minimizando a perda de carga distribuída, além de conferir elevada resistência ao ataque químico residual inerente ao lodo de estações de potabilização.

3.6 Projeto Físico e Hidráulico do Leito de Drenagem

A eficiência operacional de um leito de drenagem não mecanizado depende intrinsecamente da sua configuração estrutural interna. O projeto físico das unidades propostas para a ETA de Vera Cruz visa maximizar a taxa de percolação da água livre e, simultaneamente, assegurar o isolamento ambiental do resíduo. Para tal, a conformação de cada uma das bacias

de 572,31 m² obedecerá a uma estratificação rigorosa, compreendendo o sistema de impermeabilização, a rede de subdrenagem, o meio suporte e o geossintético filtrante.

3.6.1 Regularização e Impermeabilização de Fundo.

O primeiro passo da intervenção consiste na regularização geométrica das cavas de terra existentes. O fundo de cada leito será nivelado e compactado, adotando-se uma declividade contínua fixada entre 1% e 2% em direção às trincheiras de drenagem, conforme as recomendações normativas da ABNT NBR 12209:2011. Para sanar o passivo ambiental de infiltração (diagnosticado na Secção 3.1) e garantir o confinamento do lodo de Classe II A, o projeto estipula a aplicação de uma barreira impermeabilizante sobre o solo regularizado. Recomenda-se a instalação de geomembranas de Polietileno de Alta Densidade (PEAD) com espessura mínima de 1,5 mm ou, alternativamente, o revestimento em concreto armado impermeabilizado. Esta camada garante que 100% do líquido percolado seja direcionado para a rede coletora, impossibilitando a contaminação do lençol freático local.

3.6.2 Rede de Subdrenagem e Camadas de Suporte.

Sobre a camada impermeabilizada, assenta-se o sistema de recolha do efluente clarificado. A rede de subdrenagem será constituída por uma espinha dorsal de tubos de policloreto de vinila (PVC) perfurados, com diâmetro nominal estipulado pelo cálculo hidráulico (usualmente 100 mm a 150 mm), instalados nas cotas mais baixas do perfil transversal. Para proteger as tubulações contra o esmagamento mecânico e evitar o carreamento de partículas, a rede será envolvida por um meio suporte de brita graduada, cujo perfil total foi dimensionado em 0,45 m.

O preenchimento estrutural dar-se-á em três subcamadas sobrepostas. A disposição esquemática deste arranjo, evidenciando o posicionamento da tubulação e a transição granulométrica do material, encontra-se detalhada na Figura 13. Respeita-se a seguinte ordem de assentamento (de baixo para cima):

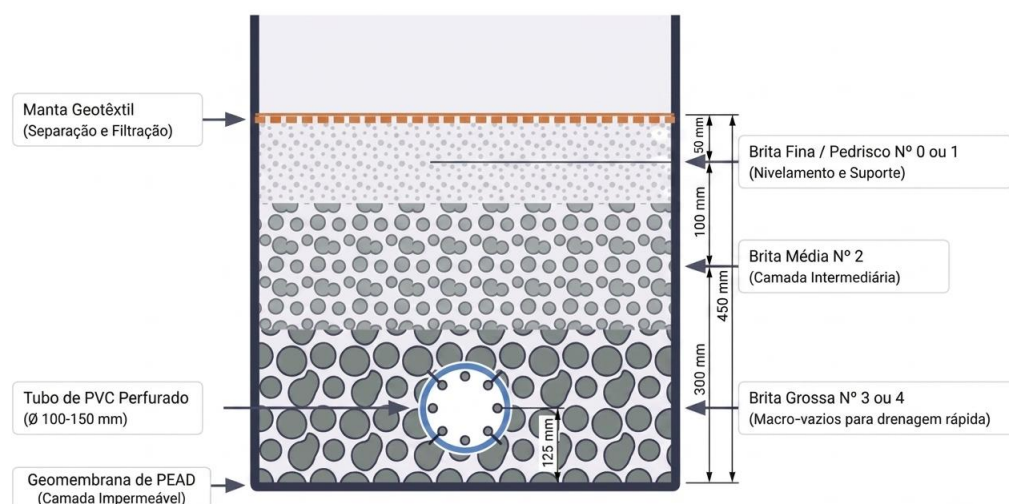
Brita Grossa (Nº 3 ou 4) – Espessura de 0,15 m: Envolvendo diretamente a tubulação perfurada, garantindo macro-vazios para o escoamento rápido e a proteção do tubo.

Brita Média (Nº 2) – Espessura de 0,10 m: Camada de transição intermédia, atuando como um filtro natural para reter materiais mais finos.

Brita Fina/Pedrisco (Nº 0 ou 1) – Espessura de 0,05 m: Camada superior fina,

responsável por criar uma superfície plana e de suporte mecânico suave e nivelado para o assentamento seguro do geossintético, evitando punções na manta.

Figura 13 - Corte transversal dimensionado da cama de filtração e drenagem, ilustrando as espessuras e a disposição dos materiais construtivos.



Fonte: O Autor (2026).

3.6.3 O Meio Filtrante Geossintético e a Aplicação da Lei de Darcy.

O avanço tecnológico deste dimensionamento consiste na substituição da tradicional camada de areia por uma manta geotêxtil não tecida, assentada diretamente sobre a camada de brita fina. A especificação do geossintético baseia-se em dois parâmetros fundamentais de mecânica dos fluidos: a abertura aparente de poros (O95) e o coeficiente de permeabilidade normal.

Para que o sistema opere sem atingir o colapso hidráulico (colmatação), a escolha metodológica da manta deve satisfazer o critério de permeabilidade regido pela Lei de Darcy para escoamento em meios porosos (SANTOS, 2014):

$$V = K \times i \quad (5)$$

Em que:

V: é a velocidade de descarga (taxa de filtração),

K: é o coeficiente de permeabilidade do meio e;

I: é o gradiente hidráulico.

Para garantir a continuidade do fluxo e a desidratação contínua da torta, o projeto estabelece como premissa metodológica que o coeficiente de permeabilidade da manta geotêxtil (K_{manta}) seja estruturalmente muito superior ao coeficiente de permeabilidade do lodo adensado (K_{lodo}). Esta configuração teórica exige que o geossintético atue estritamente como uma interface de retenção física superficial, sem se tornar o fator limitante do escoamento.

3.6.4 Parâmetros Normativos para Especificação do Geossintético.

A seleção do elemento filtrante sintético não ocorrerá de forma empírica, mas obedecerá a um rigoroso escrutínio de propriedades físico-mecânicas e hidráulicas, balizado pelas normas vigentes. A metodologia de especificação avaliará catálogos de fabricantes nacionais de geossintéticos, adotando como premissa a seleção de geotêxteis não tecidos agulhados 100% polipropileno (PP) ou poliéster (PET). A validação do material exigirá o atendimento simultâneo a três critérios de engenharia:

1. Critério de Retenção:

Avaliado pela Abertura de Filtração Aparente (AFA ou O95), determinada por ensaios equivalentes à norma internacional da American Society for Testing and Materials (ASTM) D 4751. A AFA especificada deverá ser calibrada para ser inferior ao D85 (diâmetro para o qual 85% em massa das partículas são menores) dos flocos de lodo adensado, garantindo a formação eficiente da pré-capa filtrante e impedindo o fenômeno de blinding (cegamento), que ocorre quando partículas ultrafinas inerentes ao uso de sais de alumínio bloqueiam superficialmente os poros da manta.

2. Critério de Permeabilidade:

A condutividade hidráulica normal ao plano e a permissividade da manta, avaliadas segundo a norma ASTM D 4491, deverão apresentar valores de projeto rigorosamente superiores à taxa de aplicação de líquido esperada, mitigando o risco de geração de poropressão excessiva na interface lodo-geotêxtil.

3. Critério de Sobrevivência (Resistência Mecânica):

Considerando as intervenções periódicas para a raspagem da torta de lodo seco, o material deverá possuir elevadas propriedades mecânicas, destacando-se a resistência à tração

longitudinal e transversal, bem como a resistência ao puncionamento estático (ensaio de Índice de Suporte Califórnia, do inglês California Bearing Ratio - CBR, segundo a norma ASTM D 6241). A gramatura do geossintético será especificada visando suportar o atrito das ferramentas manuais e a carga de minicarregadeiras durante a manutenção, sem sofrer esgarçamento ou ruptura.

3.7 Avaliação Econômica e Orçamentação Preliminar

Para atestar a viabilidade econômica da substituição dos leitos convencionais pelo sistema geossintético, a metodologia abrange a elaboração de um estudo comparativo de custos, segregado em despesas de capital (CAPEX) e despesas operacionais (OPEX). O orçamento preliminar (CAPEX) será estruturado a partir do levantamento quantitativo dos serviços de engenharia demandados para a readequação geométrica das cavas existentes na ETA. Os volumes de movimentação de terra (corte, aterro e regularização), as áreas de impermeabilização com geomembrana de PEAD, as metragens lineares de tubulação de PVC perfurado, a cubagem das camadas de brita e a área total de fornecimento e instalação do geotêxtil serão quantificados.

As composições de custos unitários utilizarão como base de referência o Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI), regionalizado para o Rio Grande do Sul. Em paralelo, o OPEX projetado modelará as despesas de manutenção da infraestrutura. Serão computadas as horas-máquina e a mão de obra necessárias para a limpeza periódica das câmaras, bem como o consumo energético dos conjuntos motobombas designados para o recalque do efluente drenado. Essa modelagem financeira fornecerá à autarquia municipal a previsibilidade dos custos de implantação e operação, confirmando a viabilidade econômica do sistema frente à mitigação de passivos ambientais.

3.8 Diretrizes para o Reúso do Efluente Drenado

O fecho do ciclo de tratamento do lodo de forma sustentável exige que a fração líquida recuperada (efluente clarificado) seja adequadamente gerida, evitando o seu descarte direto no meio ambiente e garantindo o pleno cumprimento das exigências de lançamento estipuladas pela Resolução CONAMA nº 430/2011. A eficiência de retenção de sólidos superior a 99% proporcionada pela restrição física da manta geotêxtil (SANTOS et al., 2021) confere a este efluente percolado características de baixa turbidez, o que viabiliza tecnicamente a sua reinserção no processo de potabilização.

Para efetivar este reaproveitamento hídrico, o projeto contemplará o arranjo físico-hidráulico de um sistema de recolha e bombagem. A rede de subdrenagem em PVC perfurado, instalada na base estrutural de cada leito, convergirá por ação da gravidade para uma estrutura coletora centralizada, designada por poço de sucção (ou caixa de reunião). Esta unidade será projetada em betão armado e devidamente impermeabilizada, posicionada na cota mais baixa do terreno contíguo aos leitos, de modo a garantir o escoamento contínuo sem afogamento da rede drenante.

A partir do poço de sucção, será especificado um conjunto motobomba (submersível ou centrífugo de eixo horizontal), dimensionado com base no cálculo da altura manométrica total e no caudal de infiltração esperado durante o ciclo de desidratação. A tubagem de recalque será projetada para reconduzir o líquido clarificado até à estrutura de entrada de água bruta da ETA de Vera Cruz (preferencialmente a jusante da calha Parshall ou na câmara de mistura rápida).

Figura 14 - Estrutura de chegada de água bruta e câmara de mistura rápida da ETA Central, ponto designado para a reincorporação do efluente clarificado proveniente dos leitos de drenagem.



Fonte: O Autor (2026).

Esta configuração em circuito fechado garante que o volume de água que outrora representava uma perda operacional (oriunda da lavagem de filtros e descargas de decantadores) seja reincorporado no caudal de tratamento. Dessa forma, consolida-se a ecoeficiência da planta, mitigando o desperdício hídrico e atestando a viabilidade ambiental da intervenção

estrutural nas cavas existentes.

3.9 Dimensionamento Hidrológico e Volume de Amortecimento.

A viabilidade de operação a céu aberto dos leitos de drenagem na ETA de Vera Cruz exigiu a quantificação do volume de águas pluviais incidentes sobre a área de filtração. A negligência desta parcela hídrica poderia resultar no colapso do sistema de drenagem e no transbordamento da mistura de lodo e efluente clarificado durante eventos de tempestade.

Para a determinação da vazão máxima pluvial de projeto (Q_p), aplicou-se o Método Racional. Consagrado na literatura hidrológica brasileira (TUCCI, 2013; PORTO, 2006), este método determinístico é o modelo matemático mais utilizado para o cálculo de vazões de pico em microbacias com áreas de contribuição inferiores a 2 km². A formulação obedece à seguinte relação:

$$Q_p = \frac{C \times i \times A}{360} \quad (6)$$

A parametrização das variáveis do projeto considerou o cenário operacional mais crítico (leito operando sob chuvas intensas):

Em que:

Q_p = Vazão máxima pluvial de projeto (m³/s);

C = Coeficiente de escoamento superficial ou deflúvio (adimensional, adotado 0,95 devido à impermeabilidade da geomembrana e do lodo);

i = Intensidade média da precipitação (mm/h);

A = Área da bacia de contribuição superficial (ha, correspondente a 0,1145 ha);

360 = Fator de conversão para compatibilização das unidades da equação.

A intensidade de precipitação (i) será extraída a partir da equação de chuvas intensas (Curva IDF) regionalizada. Visando resguardar a infraestrutura contra inundações, a equação genérica assume a forma:

$$i = \frac{K \times TR^a}{(tc + b)^c} \quad (7)$$

Em que:

I = Intensidade máxima de precipitação esperada (mm/h);

TR = Tempo de Retorno ou período de recorrência do evento extremo (anos, adotado 10 anos para resguardar a infraestrutura);

tc = Tempo de concentração da microbacia (minutos, adotado 10 minutos devido às dimensões reduzidas da cava);

K, a, b, c = Coeficientes e expoentes regionais ajustados estatisticamente para o município (para a região de Santa Cruz do Sul).

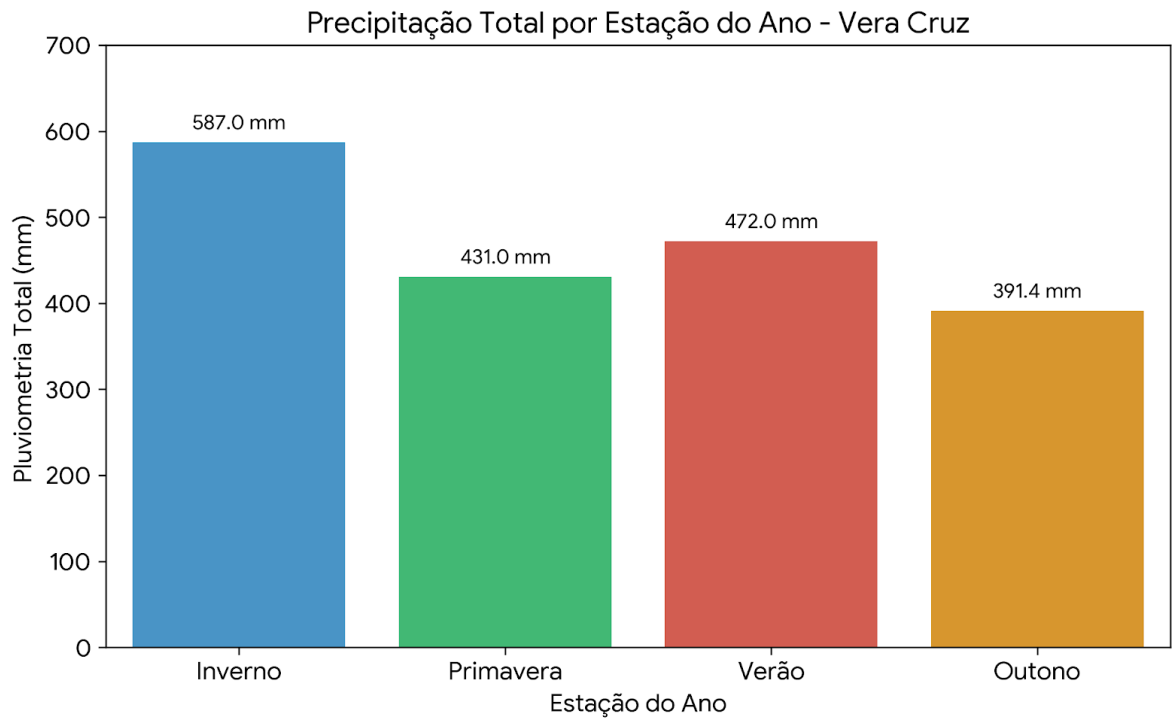
A parametrização destas variáveis, bem como a resolução algébrica para a definição da vazão de pico que incidirá sobre o sistema, encontram-se detalhadas no escopo dos resultados operacionais deste trabalho.

3.9.1 Validação Climática e Análise Pluviométrica Recente

Para corroborar a modelagem teórica da Curva IDF com o comportamento climático real da região de implantação, procedeu-se à análise dos dados pluviométricos recentes registrados pela estação meteorológica da UNISC no município de Vera Cruz, compreendendo o ciclo de junho de 2025 a junho de 2026.

Gráfico 4 - Distribuição sazonal da pluviosidade na área de estudo, destacando a maior

severidade de chuvas durante o período de inverno.



Fonte: O Autor (2026).

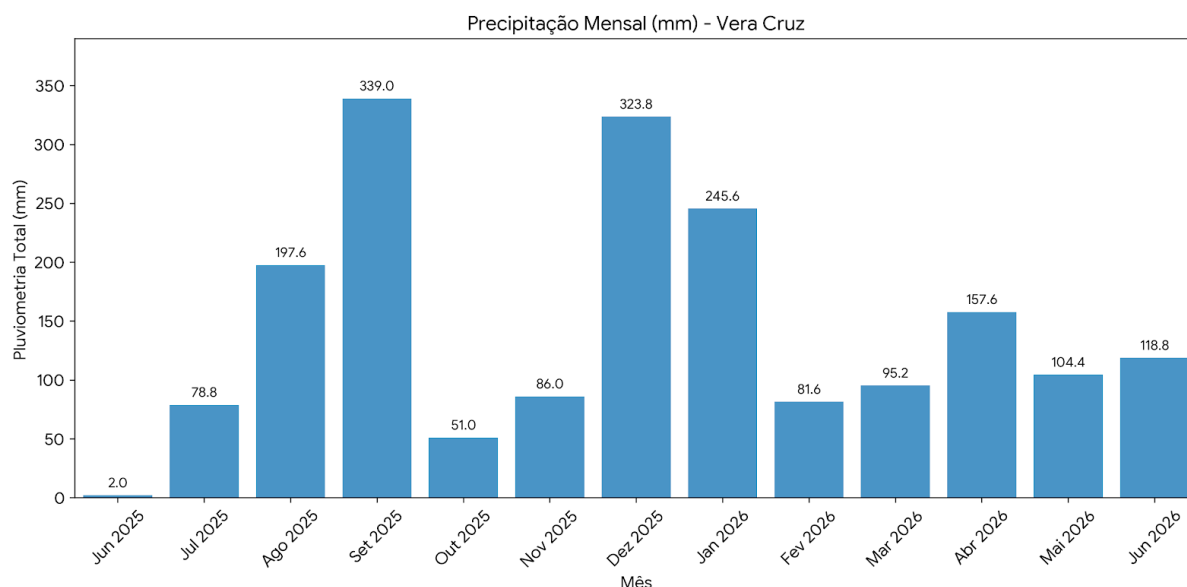
Tabela 1 - Caracterização pluviométrica e eventos extremos.

Parâmetro	Valor Observado
Período Analisado	29 de junho de 2025 a 30 de junho de 2026
Volume Total Acumulado	1.881,40 mm
Pico Máximo Diário	110,00 mm (registrado em 18/01/2026)
Média Diária Geral	5,33 mm/dia
Frequência de Chuva	Choveu em 133 dos 353 dias monitorados (37% dos dias)

Fonte: O Autor (2026).

Gráfico 5 - Histórico da precipitação pluviométrica mensal no município de Vera

Cruz/RS, compreendendo o período de junho de 2025 a junho de 2026.



Fonte: O Autor (2026).

O monitoramento in loco revelou um volume pluviométrico acumulado de 1.881,40 mm, com o período de inverno apresentando a maior severidade (587,00 mm). Sob a ótica do projeto executivo, a variável hidrológica limitante extraída deste histórico é o pico máximo diário de precipitação, que atingiu a marca de 110,00 mm. Este dado empírico confirma a necessidade operacional da borda livre de segurança ($H_b = 0,15 \text{ m}$), garantindo que a margem seca seja capaz de reter o volume de tempestades intensas sem comprometer o extravasamento lateral dos leitos. A adoção do valor de 0,15 m para a borda livre (H_b) não decorre de uma formulação matemática estrita, mas sim do cumprimento de parâmetros normativos de segurança estrutural estabelecidos para unidades de tratamento a céu aberto. Segundo as diretrizes da ABNT NBR 12209:2011 e a literatura clássica de engenharia sanitária (DI BERNARDO et al., 2012), recomenda-se um resguardo mínimo entre 0,15 m e 0,30 m acima da cota máxima de operação. Este dimensionamento atua como um fator de mitigação de riscos operacionais imprevisíveis, absorvendo flutuações temporárias do nível d'água causadas por fatores como: a ação de ventos e ondulações na superfície livre; falhas humanas resultantes de descargas de lodo além do limite de projeto de 0,50 m; colmatção severa e temporária do geossintético que atrase a cinética de filtração; e eventos climáticos extremos que superem a intensidade pluviométrica de projeto de 110 mm. Dessa forma, a borda livre de 0,15 m consolida o confinamento seguro da biomassa e resguarda o solo do entorno contra contaminações por transbordamento.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo destina-se à apresentação e análise pormenorizada dos resultados obtidos a partir da aplicação das diretrizes metodológicas estabelecidas. O percurso analítico inicia-se com a quantificação matemática da carga mássica e volumétrica do lodo gerado na Estação de Tratamento de Água (ETA) de Vera Cruz, fornecendo a base de cálculo fundamental para a infraestrutura. Na sequência, detalha-se o dimensionamento geométrico e hidráulico dos novos leitos de drenagem, validando a inserção física da obra por meio dos dados topográficos levantados e da respectiva representação gráfica em planta baixa. O escopo dos resultados abrange também a estabilidade geotécnica das estruturas, a especificação técnica do elemento filtrante geossintético e a orçamentação preliminar de implantação (CAPEX). Por fim, o texto consolida a matriz de decisão tecnológica e a logística de destinação do resíduo desidratado, comprovando analiticamente a viabilidade econômica, operacional e ambiental da adoção de mantas geotéxteis para a otimização do saneamento municipal.

4.1 Estimativa da Carga Mássica e Volumétrica de Lodo.

Conforme a formulação metodológica estabelecida a partir de Reali (1999), a massa de sólidos secos (M_s) foi calculada adotando-se os parâmetros críticos de operação da ETA Vera Cruz para garantir o fator de segurança do projeto. Assumiu-se a vazão nominal de 120 L/s, que corresponde a um volume de produção de 10.368 m³/dia. Para a turbidez da água bruta, adotou-se o valor de 50 uT, que representa um cenário operacional adverso para os períodos chuvosos na sub-bacia do Arroio Andréas. Para a dosagem de Policloreto de Alumínio (PAC), estipulou-se a concentração de 30 mg/L. Substituindo estes parâmetros na equação empírica e aplicando o coeficiente estequiométrico ($K = 0,20$), obtém-se a carga mássica diária do projeto:

$$M_s = 10.368 \times [(1,5 \times 50) + (0,20 \times 30)] \times 10^{-3}$$

$$M_s = 10.368 \times [75 + 6,0] \times 10^{-3}$$

$$M_s = 10.368 \times 81,0 \times 10^{-3}$$

$$M_s = 839,81 \text{ kg/dia}$$

4.1.1 Resultado do Volume de Lodo Úmido.

A partir do conhecimento da massa seca, procedeu-se à determinação do volume físico ocupado por esse resíduo no estado líquido (V_i). Assumindo as premissas empíricas da metodologia (lodo in natura com concentração volumétrica de sólidos de aproximadamente

1,0% e peso específico estimado em 1.010 kg/m^3), a conversão resulta em:

$$Vi = \frac{839,81}{1.010 \times 0,01}$$

$$Vi = 83,15 \text{ m}^3/\text{dia}$$

Dessa forma, comprova-se analiticamente que o novo sistema de leitos de drenagem necessitará de capacidade volumétrica e área de filtração suficientes para recepcionar e processar um fluxo afluente de $85,00 \text{ m}^3$ de lodo úmido a cada descarte diário. Esse parâmetro conservador baliza com segurança todo o dimensionamento geométrico da obra civil, detalhado nas seções subsequentes.

Esse parâmetro conservador baliza com segurança todo o dimensionamento geométrico da obra civil, detalhado nas seções subsequentes. Apesar da adoção de parâmetros majorados na formulação matemática, a variabilidade temporal intrínseca à qualidade da água bruta do manancial Arroio Andréas pode ocasionar episódios sazonais de turbidez extrema (cenários de pior caso). Tais eventos hidrológicos têm o potencial de elevar temporariamente a geração de sólidos acima da cota projetada de $858,47 \text{ kg}/\text{dia}$. Para absorver estes picos pluviométricos e operacionais sem o risco de colapso hidráulico, o sistema conta com dupla resiliência. Fisicamente, a adoção da lâmina útil de lodo de $0,50 \text{ m}$ associada à borda livre de segurança de $0,15 \text{ m}$ confere às unidades uma capacidade de amortecimento volumétrico transitório. Operacionalmente, a flexibilidade estrutural do leito permite a redução pontual do tempo de ciclo (T_c), originalmente estipulado em 20 dias. Em eventos de sobrecarga severa, a remoção da torta de lodo sobre o geossintético pode ser antecipada, admitindo-se a extração de um material com teor de umidade marginalmente superior. Tal manobra de contingência elevará de forma transitória a demanda logística de fretes (OPEX), porém resguardará a integridade estrutural das cavas e assegurará a continuidade ininterrupta do processo de potabilização da autarquia.

4.1.2 Resultado da Área Superficial Total (A_{total})

A partir da carga mássica de projeto calculada nas seções anteriores e da adoção dos parâmetros operacionais conservadores (ciclo de 20 dias e TAS de 15 kg/m^2), procedeu-se à determinação da área ativa de filtração exigida para o sistema. A substituição algébrica na formulação metodológica resulta em:

$$A_{total} = \frac{(Ms \times Tc)}{TAS}$$

$$A_{total} = \frac{839,81 \times 20}{15}$$

$$A_{total} = \frac{16.796,20}{15}$$

$$A_{total} = 1.119,75 \text{ m}^2$$

Este valor teórico fundamenta a necessidade de implantação de uma infraestrutura com área útil mínima de 1.119,75 m², a qual será fisicamente dividida em duas câmaras simétricas para garantir a alternância dos ciclos de secagem e a operação contínua da estação de tratamento.

4.2 Dimensionamento Geométrico Final e Validação Espacial

O dimensionamento conceitual, detalhado na metodologia, estabeleceu a necessidade de uma área ativa de filtração de 1.119,75 m² para processar a carga de sólidos gerada pela ETA Vera Cruz, dividida idealmente em duas unidades operacionais simétricas de 572,31 m² cada. Para validar a exequibilidade física desta implantação no terreno, os dados brutos da caderneta de campo do levantamento topográfico foram processados e integrados a um Sistema de Informação Geográfica (software Quantum Geographic Information System - QGIS).

O georreferenciamento permitiu a delimitação exata das feições antropizadas. Conforme ilustrado na Figura 15.

Figura 15 - Delimitação da área de implantação proposta para os leitos de drenagem

(destacada em amarelo), localizadas sobre as cavas inoperantes da ETA Vera Cruz/RS.



Fonte: O Autor (2026).

O mapeamento das duas cavas inoperantes revelou as seguintes áreas de fundo aparentes: a lagoa posicionada à direita apresenta aproximadamente 686,57 m², enquanto a lagoa à esquerda possui 495,45 m². A soma destas bacias perfaz uma área previamente escavada de 1.182,02 m², valor que já atende e supera ligeiramente a exigência teórica de filtração do projeto (1.119,75 m²).

Adicionalmente, a análise espacial do polígono envolvente no QGIS comprovou a existência de uma macrorregião de platô de aproximadamente 2.050,00 m² disponível para intervenção. Esta métrica de folga espacial é de extrema relevância para a engenharia do projeto. Embora a lagoa esquerda em seu estado atual (495,45 m²) possua dimensões inferiores à área útil exigida por leito (572,31 m²), a disponibilidade de 2.050 m² de área total garante que o espaço físico é plenamente suficiente para a execução das manobras de terraplenagem.

Dessa forma, a área total exigida será dividida de forma assimétrica: o Leito B (menor) será alocado na cava esquerda, demandando uma área útil de fundo de aproximadamente 470,25 m²; o Leito A (maior) ocupará a cava direita, com uma área útil estipulada em 649,50 m². Como ambas as áreas úteis projetadas são inferiores às metragens reais dos respectivos buracos existentes, a obra civil restringir-se-á à regularização e compactação dos taludes internos na inclinação de projeto (1V:1,5H), aproveitando integralmente o platô sem a necessidade de escavações adicionais no maciço adjacente. A Tabela 2 sintetiza a validação geométrica do sistema otimizado.

Tabela 2 - Balanço Geométrico e Validação de Área do Projeto.

Parâmetro Geométrico	Valor de Projeto / Levantamento	Status / Observação
Área Total de Filtração Exigida	1.119,75 m ²	Baseado na TAS de 15 kg/m ² e ciclo de 20 dias.
Área Exigida por Leito (2 unidades)	572,31 m ²	Regime de alternância operacional.
Área Atual - Cava Direita (QGIS)	686,57 m ²	Superior à exigência. Permite conformação de taludes.
Área Atual - Cava Esquerda (QGIS)	495,45 m ²	Inferior à exigência. Entretanto, não será necessário intervenções.
Área Útil Existente Combinada	1.182,02 m ²	O platô escavado atende à demanda teórica.
Área Total Disponível para Obra	2.050,00 m ²	Garante espaço para terraplenagem e rampas.

Fonte: O Autor (2026).

4.2.1 Especificação Técnica do Meio Filtrante Geossintético

A partir das premissas metodológicas balizadas pela Lei de Darcy e pela necessidade de evitar a obstrução superficial da malha, a seleção definitiva do meio filtrante recaiu sobre a utilização de mantas geotêxteis não tecidas (agulhadas). Para evitar o fenômeno de blinding (cegamento dos poros) ocasionado pelas partículas finas do lodo associado ao Policloreto de Alumínio, o projeto estipula a adoção de um geotêxtil de poliéster (PET) ou polipropileno (PP) com gramatura mínima de 300 g/m².

As propriedades hidráulicas específicas exigidas para o fornecimento do material contemplam uma Abertura de Filtração Aparente (AFA) rigorosamente inferior a 0,15 mm e uma permissividade superior a 1,0 s⁻¹. Esta calibração hidráulica é o fator que garante que a perda de carga do sistema ocorra predominantemente na própria torta de lodo, permitindo a passagem livre e contínua do efluente clarificado com retenção de sólidos superior a 99%. Sob a ótica mecânica, estipula-se uma resistência à tração transversal e longitudinal superior a 15 kN/m e resistência ao puncionamento CBR superior a 2,5 kN, atestando a sobrevivência do material frente aos esforços de raspagem mecânica ao final de cada ciclo de 20 dias.

Para assegurar a recuperação da água livre clarificada, o dimensionamento hidráulico da interface lodo-geotêxtil exige a compreensão da variabilidade temporal da perda de carga ao longo do ciclo operacional de 20 dias. De acordo com a teoria da filtração de fluidos compressíveis, a perda de carga total do sistema (ΔH_{total}) não é estática; ela é o somatório da perda de carga intrínseca ao geossintético (ΔH_{geo}) e da perda de carga gerada pela torta de lodo (ΔH_{lodo}).

Nos instantes iniciais (Dias 1 a 3), a permeabilidade do lodo fluido é elevada e a resistência ao escoamento é ditada predominantemente pelas propriedades da manta (permissividade superior a $1,0 \text{ s}^{-1}$). Contudo, à medida que ocorre a drenagem gravitacional rápida, as partículas sólidas acumulam-se e formam a pré-capa filtrante. A partir deste ponto (Fase Lenta), a compressibilidade do lodo sob seu próprio peso adensado reduz drasticamente o índice de vazios da torta, elevando exponencialmente a Resistência Específica à Filtração (REF).

Neste estágio de adensamento, o gradiente hidráulico (i) altera-se significativamente: a componente ΔH_{lodo} passa a governar a perda de carga do sistema, aproximando a curva de percolação de um comportamento assintótico, onde a vazão de efluente drenado cai a valores residuais e o processo de secagem passa a ser dominado exclusivamente pela evaporação superficial e fissuração mecânica. Cumpre ressaltar que, por tratar-se de um projeto conceitual, a representação gráfica exata desta curva de perda de carga temporal e a obtenção dos coeficientes de compressibilidade requerem a execução de ensaios laboratoriais de filtração em coluna de permeabilidade variável, etapa esta rigorosamente recomendada para o detalhamento do Projeto Executivo da obra.

4.2.2 Detalhamento Geométrico e Volumétrico.

Para balizar a execução da obra civil, as dimensões retangulares de cada leito foram estipuladas visando otimizar o fluxo hidráulico longitudinal e garantir um raio de manobra seguro para as minicarregadeiras durante a extração da torta seca. A partir da área de projeto ($572,31 \text{ m}^2$), adotou-se uma geometria de fundo de 15,00 metros de largura por 38,20 metros de comprimento, perfazendo $573,00 \text{ m}^2$ de área ativa por leito.

A profundidade total da escavação foi definida pelo somatório da espessura do pacote drenante (0,45 m de brita), da lâmina máxima de lodo úmido descarregado a cada ciclo (estipulada em 0,50 m) e de uma borda livre de segurança (0,15 m) para conter precipitações extremas. A **Tabela 3** apresenta o detalhamento geométrico da seção transversal e o volume útil de armazenamento para cada unidade.

Tabela 3 - Parâmetros Construtivos e Dimensionais de cada Leito de Drenagem.

Parâmetro Construtivo	Dimensão Adotada	Finalidade Técnica
Largura útil de fundo	15,00 m	Otimização do escoamento e acesso mecanizado.

Comprimento útil de fundo	38,20 m	Perfil longitudinal de distribuição do lodo.
Área útil de filtração (fundo)	573,00 m ²	Área efetiva de contato do lodo com a manta.
Inclinação dos taludes internos	1V : 1,5H	Estabilidade geotécnica e ancoragem da manta.
Espessura da camada suporte (Britas)	0,45 m	Confinamento e proteção da rede de drenos.
Profundidade útil máxima (Lodo)	0,50 m	Camada máxima para permitir evaporação eficiente.
Borda livre de segurança	0,15 m	Prevenção de transbordamentos (chuvas intensas).
Profundidade Total da Escavação	1,10 m	Somatório das camadas (0,45m + 0,50m + 0,15m).
Volume Útil de Lodo por Ciclo	286,50 m ³	Capacidade máxima de recepção de lodo fluido por bacia.

Fonte: O Autor (2026).

4.2.4 Resultado do Dimensionamento Hidrológico e Vazão de Pico

Para a quantificação da vazão máxima pluvial incidente sobre as bacias, procedeu-se à parametrização das variáveis do Método Racional, considerando o cenário operacional mais crítico de leito operando sob chuvas intensas. Adotou-se o coeficiente de escoamento superficial $HÁ$ de 0,95, justificado pela impermeabilidade conferida pela geomembrana e pela saturação do lodo subjacente. A área de contribuição (A) corresponde à área ativa total dos leitos, estipulada em 0,1145 há (1.144,62 m²).

Para o cálculo da intensidade pluviométrica (i), estipulou-se um Tempo de Retorno (TR) de 10 anos e um tempo de concentração (tc) de 10 minutos, reflexo das dimensões reduzidas da cava. Utilizando os coeficientes regionais padronizados para Santa Cruz do Sul e região ($K = 1432$; $a = 0,17$; $b = 16$; $c = 0,78$), a resolução da equação de chuvas intensas resulta em:

$$i = \frac{K \times TR^a}{(tc + b)^c}$$

$$i = \frac{1432 \times 10^{0,17}}{(10 + 16)^{0,78}}$$

$$i = \frac{1432 \times 1,479}{26^{0,78}}$$

$$i = \frac{2117,92}{10,95}$$

$$i = 193,41 \text{ mm/h}$$

Com a intensidade pluviométrica determinada, efetuou-se o cálculo da vazão de pico (Q_p) esperada sobre o sistema de desaguamento:

$$Q_p = \frac{0,95 \times 193,41 \times 0,1145}{360}$$

$$Q_p = 0,058 \frac{m^3}{s} \text{ (ou } 58,0 \frac{L}{s} \text{)}$$

Este resultado comprova analiticamente que a infraestrutura de drenagem e extravasamento deverá possuir capacidade hidráulica para absorver e escoar, com total segurança, uma contribuição pluviométrica adicional de 58,0 L/s durante eventos extremos. Esta vazão extra justifica tecnicamente a adoção de bordas livres adequadas e baliza o dimensionamento diametral da rede coletora de PVC, garantindo que a água da chuva não provoque o transbordamento do lodo contaminado para o ambiente externo.

4.3 Dimensionamento Geotécnico e Estabilidade dos Taludes

A readequação física das cavas inoperantes para a conformação dos novos leitos de drenagem exigiu a definição de parâmetros rigorosos de movimentação de terra, balizados pelas diretrizes da ABNT NBR 11682:2009 (Estabilidade de Encostas). A estabilidade geotécnica das escavações é um condicionante estrutural, visto que as estruturas estarão submetidas a esforços dinâmicos durante a operação de limpeza e a variações no estado de tensões do solo decorrentes da saturação contínua. A análise de estabilidade foi pautada pelo critério de ruptura de Mohr-Coulomb. Conforme estabelecido na literatura clássica de mecânica dos solos (CAPUTO, 2015; DAS, 2011), este critério define que a resistência ao cisalhamento do solo (τ) é mobilizada pela coesão efetiva (c'), pela tensão normal efetiva (σ') e pelo ângulo de atrito interno (ϕ'), sendo expresso pela Equação 8:

$$\tau = c' + \sigma' \cdot \tan(\varphi')$$

Em que:

τ = tensão de cisalhamento no plano de ruptura;

c' = intercepto de coesão efetiva do solo;

σ' = tensão normal efetiva atuante no plano;

φ' = ângulo de atrito interno efetivo do solo.

Para o presente estudo, em virtude da ausência de ensaios de investigação geotécnica in situ específicos para a exata locação das cavas, os parâmetros de resistência mecânica foram arbitrados de forma conservadora. A adoção destes valores fundamentou-se na caracterização tátil-visual realizada em campo, aliada a dados históricos da formação geológica do Vale do Rio Pardo e a valores típicos consagrados na literatura para solos residuais argilo-siltosos. Tais solos apresentam comportamento coesivo-friccional, ou seja, mobilizam tanto coesão (c') quanto atrito (φ').

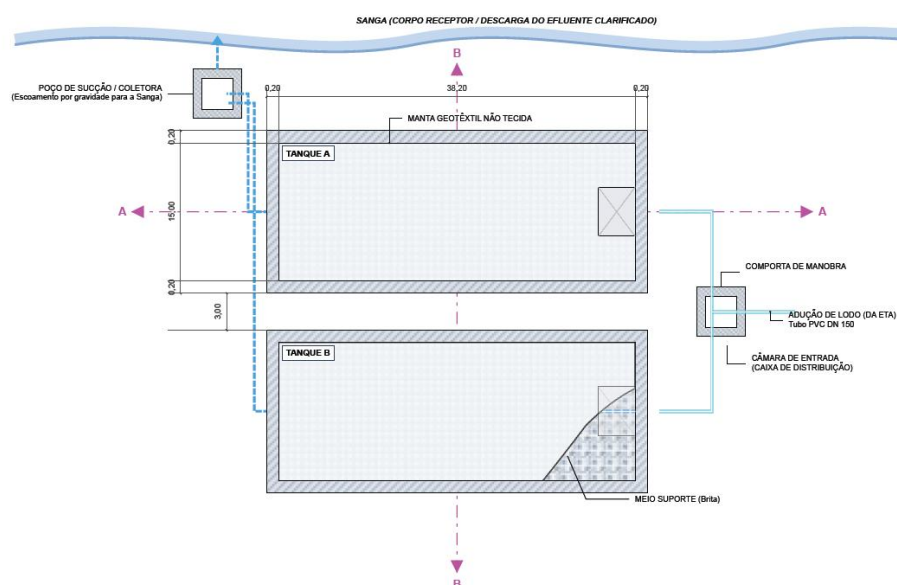
Para garantir um Fator de Segurança global ($FS > 1,5$) contra a ruptura planar ou circular, o projeto geométrico adotou uma inclinação de taludes variando de 1V:1,5H a 1V:2H (Vertical para Horizontal). Como exemplo prático de dimensionamento, a adoção de taludes mais íngremes (como 1V:1H) aumentaria significativamente o risco de escorregamentos durante chuvas intensas, devido à perda de sucção mátrica do solo (PINTO, 2006). Em contrapartida, taludes excessivamente abatidos (como 1V:3H) elevariam demasiadamente a área de pegada da obra (footprint), contrariando o objetivo principal do uso de geossintéticos, que é a otimização do espaço físico da ETA. Além de prevenir rupturas, a inclinação máxima de 1V:1,5H é recomendada por Koerner (2012) para garantir a aderência segura da geomembrana de PEAD, evitando que o material deslize sob o próprio peso.

4.4 Detalhamento do Arranjo Físico e Perfil Hidráulico

Para materializar o dimensionamento geométrico e hidráulico estabelecido nas etapas anteriores, elaborou-se o detalhamento gráfico do sistema de desaguamento. A representação em planta baixa (croqui) e os cortes (longitudinal e transversal) consolidam a inserção espacial das unidades de tratamento e definem as diretrizes executivas para a obra civil, conforme

ilustrado nas Figuras 16, 17 e 18.

Figura 16 - Layout operacional dos tanques de secagem de lodo e infraestrutura de rede de adução e drenagem.

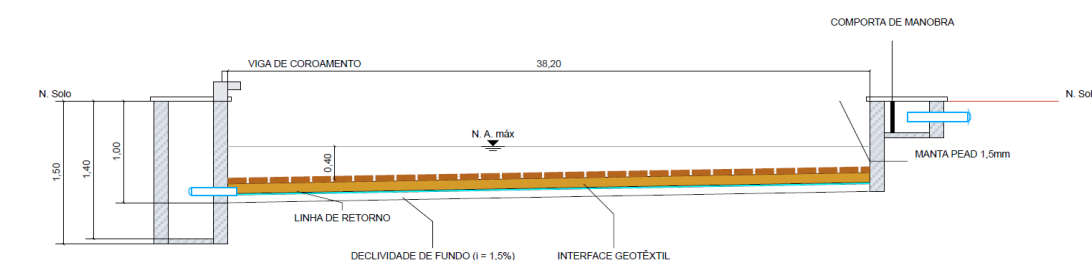


Fonte: O Autor (2026).

A análise do arranjo físico em planta evidencia a disposição de duas bacias simétricas operando em paralelo (Tanque A e Tanque B), cada uma projetada com as dimensões úteis de 15,00 metros de largura por 38,20 metros de comprimento. O distanciamento de 3,00 metros entre os leitos garante uma área de circulação segura para o trânsito de operadores e estabilidade para os taludes adjacentes. Esta configuração de unidades em paralelo constitui a premissa estrutural que assegura a redundância operacional da ETA, permitindo que um tanque permaneça em fase de secagem e raspagem enquanto o outro recebe a carga afluyente de lodo fresco.

Complementarmente, a dinâmica de operação por gravidade é atestada pelo perfil do corte longitudinal (Figura 17). O lodo proveniente da ETA é aduzido até a Câmara de Entrada (posicionada à montante do corte), onde a instalação de uma comporta de manobra permite ao operador direcionar o fluxo de maneira alternada para o tanque ativo.

Figura 17 - Corte longitudinal demonstrando o perfil hidráulico entre as unidades (Câmara de Entrada, Tanque de Secagem e Poço de Sucção), com destaque para a declividade de fundo de 1,5\%.



NOTA DO PROJETO: Corte longitudinal demonstrando o perfil hidráulico entre as unidades (Câmara de Entrada, Tanque A e Poço de Sucção).

Fonte: O Autor (2026).

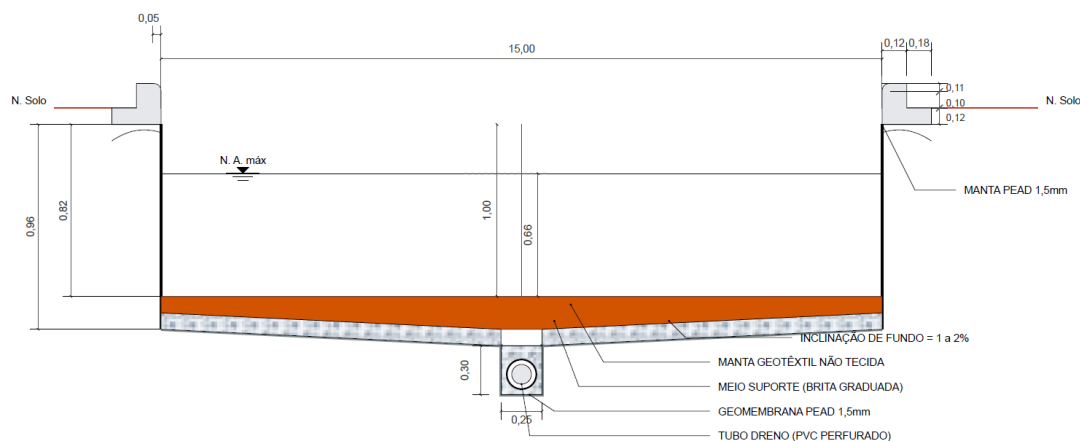
O desenho em corte longitudinal detalha a estratificação estrutural do leito: a base selada com geomembrana PEAD de 1,5 mm para evitar a contaminação do subsolo, a sobreposição da camada suporte e a interface geotêxtil atuando como elemento filtrante de retenção. No que tange ao efluente clarificado (fase líquida), a água que percola verticalmente atinge o fundo do tanque, o qual foi projetado com uma declividade contínua de 1,5%.

Este caimento de fundo induz o escoamento rápido ao longo dos 38,20 metros de extensão rumo à rede de subdrenagem (linha de retorno). Conforme demonstrado no projeto executivo, a tubulação de saída atravessa a estrutura de contenção (viga de coroamento) e conduz o líquido limpo até um Poço de Sucção comum, posicionado à jusante. A partir deste poço, a água tratada é finalmente direcionada para o corpo receptor adjacente (Sanga), respeitando estritamente o desnível topográfico e eliminando por completo a necessidade e o custo contínuo de bombeamento mecânico na planta.

Por fim, a análise do corte transversal (Figura 18) ilustra a disposição interna transversal das camadas e a geometria de fundo projetada para cada tanque. Com 15,00 metros de largura útil, o fundo da escavação apresenta uma inclinação convergente de 1% a 2% direcionada para o eixo central longitudinal. Neste eixo de cota mais baixa, localiza-se a vala de subdrenagem (dimensionada com 0,25 m de largura por 0,30 m de profundidade) destinada a alojar o tubo de PVC perfurado. O detalhe construtivo reforça a sobreposição das camadas de impermeabilização, do meio suporte de brita graduada e da manta geotêxtil não tecida, além de evidenciar a ancoragem da geomembrana de PEAD nas bordas superiores para garantir a

estanqueidade total e a integridade estrutural do sistema.

Figura 18 - Detalhamento construtivo em corte transversal: geometria do fundo, meios filtrantes e elementos de drenagem.



Fonte: O Autor (2026).

4.4.1 Resultado do Sistema de Ancoragem Perimetral (Trincheira).

Para neutralizar os esforços operacionais e satisfazer o Fator de Segurança ao arrancamento ($FS > 1,5$) estabelecido na premissa metodológica, dimensionou-se uma trincheira de ancoragem contínua ao longo da crista dos leitos.

A vala foi projetada com seção transversal retangular de 0,50 m de largura por 0,50 m de profundidade, recuada estrategicamente a 1,00 m da borda do talude. As bordas da geomembrana de PEAD e do geotêxtil não tecido devem ser inseridas no fundo e nas paredes dessa trincheira, a qual será reaterada com o próprio material de escavação e compactada mecanicamente.

O princípio físico garantido por esse arranjo geométrico é utilizar o peso do prisma de terra compactada (com altura de 0,50 m) para gerar tensão de confinamento (σ_v). Esta configuração maximiza a tensão de cisalhamento na interface solo-geossintético ao longo de todo o perímetro da bacia, garantindo que a resistência ao atrito ($\sum F_{res}$) seja amplamente superior às tensões de tração e ao atrito gerado pelas ferramentas durante a raspagem da torta de lodo, assegurando a integridade da infraestrutura contra cisalhamentos estruturais no sistema de impermeabilização.

4.4.2 Rampa de Acesso e Suporte de Carga.

Um dos grandes diferenciais operacionais proporcionados pela manta geotêxtil de alta resistência ao puncionamento é a permissão de limpeza mecanizada. Contudo, a inserção de equipamentos compactos no leito, como minicarregadeiras tipo Skid Steer, impõe tensões verticais significativas à base do sistema. Para viabilizar essa logística, o projeto geométrico incorporou uma rampa de acesso. A inclinação da rampa foi fixada em um máximo de 15% (aproximadamente 1V:6,6H).

Segundo os catálogos técnicos de fabricantes de maquinário pesado e normas de acessibilidade viária, rampas com inclinações superiores a 20% oferecem risco de tombamento para trás quando a minicarregadeira sobe carregada com a torta de lodo úmido, cujo peso específico pode ultrapassar 12 kN/m³. Por fim, a proteção estrutural da tubulação de subdrenagem em PVC contra a tensão induzida pelo rodado das máquinas é garantida pelo dimensionamento das camadas de brita. Conforme a teoria de distribuição de tensões de Boussinesq (CAPUTO, 2015), as subcamadas de brita grossa, média e fina atuam como um colchão amortecedor, dissipando a carga pontual ao longo da profundidade antes que a tensão atinja a geratriz superior dos drenos plásticos.

4.5 Estudo de Alternativas Tecnológicas para Desaguamento

A seleção da tecnologia de desaguamento para a ETA de Vera Cruz não foi fundamentada de maneira empírica, mas através de uma análise multicritério que ponderou a sustentabilidade financeira, a complexidade operacional e a eficiência do processo. Cumpre ressaltar que os critérios utilizados nesta matriz de decisão possuem caráter eminentemente qualitativo, sendo norteados pelas condições específicas e restrições da ETA em estudo, tais como a ampla disponibilidade de área física marginal e o perfil de financiamento da autarquia municipal. Para validar a adoção dos leitos de drenagem revestidos com geossintéticos, elaborou-se um estudo comparativo frente às duas tecnologias mecanizadas mais consolidadas no setor de saneamento para o adensamento e desidratação de lodos coloidais: as Centrífugas Decanter e os Filtros-Prensa (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2012).

I. Filtros-Prensa de Câmaras: Operam por batelada, forçando o lodo através de lonas filtrantes sob elevada pressão hidráulica. Embora alcancem excelentes teores de sólidos na torta final (frequentemente superiores a 30%), exigem um condicionamento químico prévio rigoroso (adição de polímeros catiônicos ou cal) para reduzir a compressibilidade do lodo. Apresentam elevado custo de implantação (CAPEX) e exigem manutenção mecânica frequente, com a substituição periódica e lavagem ácida das placas (RICHTER, 2001).

II. Centrífugas Decanter: Equipamentos de operação contínua que separam as fases sólida e líquida pela aplicação de forças centrífugas de alta rotação. Possuem a vantagem de ocupar áreas físicas (footprints) extremamente reduzidas. No entanto, o consumo de energia elétrica é massivo e a operação exige mão de obra altamente qualificada para o controle de torque e calibração de polímeros. O custo operacional (OPEX) atrelado a estas máquinas é frequentemente restritivo para autarquias municipais de médio porte.

III. Leitos de Drenagem com Geotêxtil (Solução Adotada): Sistema natural otimizado que utiliza a gravidade e o gradiente de evapotranspiração atmosférica. Elimina o consumo energético primário no desaguamento, substituindo o gasto permanente com eletricidade e manutenção industrial pelo uso racional da área física marginal da ETA. A inserção do geotêxtil anula os problemas históricos de colmatação dos leitos de areia, garantindo longevidade ao sistema (SANTOS, 2014).

4.5.1 Matriz de Decisão Multicritério.

Para a tomada de decisão técnica aplicada à realidade do Serviço Municipal de Água e Esgoto (SEMAE), estruturou-se uma matriz de ponderação comparativa. Atribuíram-se notas de 1 (Desfavorável/Alto Custo) a 3 (Muito Favorável/Baixo Custo) para cinco parâmetros fundamentais de engenharia, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 - Matriz de decisão tecnológica para o gerenciamento do lodo.

Critério de Avaliação	Filtro-Prensa	Centrífuga Decanter	Leito com Geotêxtil
1. Custo de Implantação (CAPEX)	1	1	3
2. Custo Operacional e Energia (OPEX)	1	1	3
3. Necessidade de Mão de Obra Qualificada	2	1	3

4. Otimização de Área Física (Footprint)	3	3	1
5. Qualidade do Efluente Drenado (Reúso)	2	2	3
PONTUAÇÃO TOTAL	9	8	13

Fonte: O Autor (2026).

A análise da matriz de decisão evidencia que, para a realidade de municípios de médio porte, a desvantagem da maior necessidade de área física (Critério 4) do leito de drenagem é amplamente compensada pela drástica redução nos custos de implantação e operação (Critérios 1 e 2). Adicionalmente, a simplicidade operacional (Critério 3) permite que os próprios operadores atuais da ETA gerenciem as manobras de válvulas e o descarte do lodo seco, sem a necessidade de contratação de técnicos em automação industrial. Dessa forma, a adoção do sistema geossintético confirma-se como a intervenção de engenharia de maior viabilidade técnica e econômica.

4.6 Gerenciamento Logístico e Destinação Final do Lodo Desidratado

O dimensionamento dos leitos de drenagem com geossintéticos soluciona a etapa de condicionamento do lodo; contudo, o ciclo de saneamento apenas se encerra com a disposição final ambientalmente adequada do material gerado. O impacto mais significativo da intervenção proposta reflete-se diretamente na logística de transporte, convertendo um passivo líquido de alto custo em um resíduo semissólido gerenciável.

4.6.1 Otimização do OPEX de Transporte (A Matemática do Frete)

Para mensurar a viabilidade econômica da desidratação, elaborou-se uma estimativa logística baseada na carga mássica de projeto calculada na Metodologia. Considerando que a ETA de Vera Cruz gera 17.169,40 kg de massa seca por ciclo de 20 dias, analisaram-se dois cenários de esgotamento: a remoção do lodo líquido diretamente dos decantadores (Cenário Base) versus a remoção da torta desidratada sobre o geotêxtil (Cenário Projetado).

O lodo decantado in natura apresenta concentração de sólidos de aproximadamente 1%, enquanto a torta ressecada atinge, conservadoramente, 25% de teor de sólidos após o ciclo de secagem. Considerando a densidade do lodo líquido próxima à da água ($1,0 \text{ t/m}^3$) e a do lodo adensado em torno de $1,15 \text{ t/m}^3$ (RICHTER, 2001), o balanço volumétrico de transporte é apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 - Balanço Volumétrico e Logístico Comparativo.

Parâmetro Analisado	Cenário Base (Lodo Líquido - 1% ST)	Cenário Projetado (Torta Seca - 25% ST)
Massa Seca Total (kg/ciclo)	16.796,20	16.796,20
Massa Úmida a Transportar (ton/ciclo)	1.679,62	67,18
Volume Estimado (m^3/ciclo)	1.663,00	58,42
Tipo de Veículo Requerido	Caminhão Limpa-Fossa (Sucção Vácuo)	Caminhão Basculante (Toco/Caçamba)
Capacidade Média do Veículo	12 m^3	12 m^3 (aprox. 15 ton)
Nº de Viagens Necessárias (Fretes)	139 viagens	5 viagens
Horas-Máquina Estimadas*	286 horas	10 horas

Fonte: O Autor (2026).

Para a formatação deste quadro comparativo, foram adotadas premissas logísticas conservadoras. Estimou-se que cada viagem (ciclo completo de carga, trânsito de ida, pesagem, manobra de descarga no aterro sanitário licenciado mais próximo e trânsito de retorno à ETA) demande aproximadamente 2 horas de operação contínua do veículo. Adotou-se o caminhão de

12 m³ como maquinário padrão para ambos os cenários, equiparando a capacidade volumétrica do caminhão limpa-fossa (vácuo) com a do caminhão basculante tipo "toco" (caçamba convencional).

A análise quantitativa evidencia uma redução de 96,5% no volume final a ser transportado. Para a administração municipal, isso representa a supressão de 138 fretes de caminhões pesados a cada 20 dias. Essa retração volumétrica suprime o oneroso transporte do excesso de umidade para os aterros, otimizando de forma contundente o OPEX da autarquia e reduzindo substancialmente a pegada de carbono (emissão de Gases de Efeito Estufa - GEE) associada à queima de óleo diesel na frota municipal.

4.6.2 Alternativas de Destinação e Valorização do Resíduo.

Uma vez recolhido, o Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos (PGRS) deve prever a destinação da massa sólida (Classe II A, conforme ABNT NBR 10004:2004). O projeto avalia duas alternativas exequíveis:

I. Disposição em Aterro Sanitário Industrial (Cenário Conservador). A rota logística mais tradicional consiste no transporte para aterros licenciados. Neste cenário, o lodo desidratado (59,72 m³/ciclo) é frequentemente utilizado pelas concessionárias como material de cobertura diária das células de lixo urbano. Embora blinde a prefeitura juridicamente, impõe o pagamento contínuo de tarifas por tonelada aterrada (tipping fees).

II. Incorporação na Indústria de Cerâmica Vermelha (Cenário Sustentável). Buscando a transição para a economia circular, o lodo apresenta elevado potencial para ser incorporado como matéria-prima na indústria da construção civil. Pesquisas aplicadas demonstram que a substituição parcial da argila natural por até 10% de lodo de ETA (em base seca) na massa cerâmica não compromete a resistência mecânica à compressão dos tijolos (TARTARI et al., 2011).

Para atestar a viabilidade na região do Vale do Rio Pardo, que possui tradição no setor oleiro-cerâmico, elaborou-se uma estimativa de absorção industrial. Considerando que um bloco cerâmico de vedação padrão (tijolo de 6 furos) apresenta massa seca média de 2,5 kg, e utilizando a taxa de substituição segura de 10% validada pela referida literatura (TARTARI et al., 2011) em conformidade com as exigências da ABNT NBR 15270:2017, cada bloco consumiria 0,25 kg de lodo seco de ETA.

Considerando a geração de 16.796,20 kg de lodo seco a cada ciclo de 20 dias, a ETA de Vera Cruz tem o potencial de fornecer matéria-prima secundária para a fabricação de

aproximadamente 67.184 blocos cerâmicos por ciclo (cerca de 1 milhão de tijolos por ano). O estabelecimento de acordos de cooperação técnica com olarias locais permitiria a doação dessa torta argilosa, substituindo a despesa de tarifa de aterro por uma solução de logística reversa que transforma o resíduo em subproduto construtivo, gerando valor agregado para o município.

Entretanto, cumpre destacar que a efetivação desta rota de valorização não é automática. A utilização estrutural do lodo em cerâmicas depende intrinsecamente da sua caracterização química prévia e contínua, englobando laudos de lixiviação e solubilização. O rigoroso atendimento à legislação ambiental vigente e a obtenção das devidas licenças de operação junto ao órgão ambiental competente são etapas obrigatórias. Essa validação legal garante que os compostos químicos inerentes ao tratamento de água sejam inertizados com segurança na matriz cerâmica durante a queima, anulando qualquer risco de toxicidade ou contaminação secundária.

4.7 Estimativa de Custos de Implantação (CAPEX).

Para materializar a viabilidade econômica da substituição dos leitos convencionais pelo sistema com geossintéticos, elaborou-se o orçamento preliminar das despesas de capital (CAPEX). A composição dos custos baseou-se no levantamento quantitativo dos serviços exigidos para a readequação da área total disponível de 2.050 m² e a estruturação e impermeabilização dos 1.119,75 m² de área ativa das bacias. Os valores unitários adotados refletem uma média conservadora praticada no mercado regional e no Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI) para o estado do Rio Grande do Sul (CAIXA, 2026). A Tabela 6 apresenta a estrutura sintética do orçamento da obra.

Tabela 6 – Orçamento Preliminar de Implantação (CAPEX).

Item	Descrição do Serviço / Material	Unid.	Quant. Estimada	Valor Unit. (R\$)	Valor Total (R\$)
1.0	Serviços Preliminares e Locação Topográfica	un	1	2.500,00	2.500,00
2.0	Movimentação de Terra (Corte, Aterro, Regularização)	m ³	850	25,00	21.250,00
3.0	Fornecimento e Instalação de Geomembrana PEAD (1,5 mm)	m ²	1.500	45,00	67.500,00
4.0	Rede de Subdrenagem (Tubo PVC Perfurado Ø 100-150mm)	m	120	60,00	7.200,00
5.0	Camada de Suporte (Britas nº 0, 2, 3 e 4)	m ³	515	110,00	56.650,00
6.0	Fornecimento e Instalação de Manta Geotêxtil Não Tecida	m ²	1.200	12,00	14.400,00
7.0	Obras Cíveis Acessórias (Caixa de reunião, rampas, etc.)	un	1	15.000,00	15.000,00

TOTAL	CUSTO ESTIMADO DE IMPLANTAÇÃO (CAPEX)	184.500,00
--------------	--	-------------------

Fonte: O Autor (2026).

O montante estimado para a execução integral do projeto é de R\$ 184.500,00. Sob o prisma da gestão pública, este valor consolida de maneira incisiva a viabilidade da intervenção. Conforme diagnosticado na fundamentação teórica, a implementação do programa de preservação "Protetor das Águas" proporcionou ao Serviço Municipal de Água e Esgoto (SEMAE) uma economia anual comprovada de R\$ 185.000,00 apenas na redução do consumo de produtos químicos de tratamento (SEMAE, 2021). Isto significa, na prática, que o custo total de implantação da infraestrutura de desaguamento (CAPEX) pode ser absorvido e equalizado por apenas um ano das poupanças geradas pelas melhorias ambientais da bacia, atestando o notável custo-benefício e a sustentabilidade financeira do arranjo geossintético proposto.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo central dimensionar e avaliar a viabilidade técnica, econômica e ambiental da implantação de leitos de drenagem com geossintéticos para o desaguamento do lodo gerado na Estação de Tratamento de Água (ETA) do município de Vera Cruz. Diante do passivo ambiental e dos altos custos operacionais gerados pela disposição inadequada do lodo líquido em cavas inoperantes, a pesquisa demonstrou que a substituição de tecnologias industriais de alto custo por soluções passivas e naturais é plenamente exequível para autarquias municipais de médio porte.

Sob o prisma técnico, o dimensionamento matemático atestou que a ETA demanda uma infraestrutura capaz de processar 839,81 kg de sólidos secos diários. A adoção de uma Taxa de Aplicação de Sólidos otimizada para mantas geotêxteis (15 kg/m²) resultou na necessidade de uma área ativa de 1.119,75 m², a qual foi estrategicamente dividida em duas bacias simétricas operando em paralelo. Esta geometria espelhada garante a redundância essencial para a operação contínua da planta. Além disso, a modelagem topográfica e o perfil hidráulico comprovaram que todo o escoamento, desde a adução do lodo fresco até a descarga do efluente clarificado no corpo receptor, pode ser realizado por gravidade. Esta configuração elimina por completo o consumo energético e os custos de manutenção associados a sistemas de bombeamento mecânico.

A análise geotécnica e de materiais validou a segurança estrutural da intervenção. A adoção de taludes com inclinação de 1V:1,5H e a implementação de trincheiras de ancoragem perimetrais blindam a estrutura contra escorregamentos e asseguram a estabilidade da geomembrana de PEAD. Em paralelo, a superioridade do coeficiente de permeabilidade do

geotêxtil não tecido em relação ao lodo adensado confirmou o atendimento à Lei de Darcy, garantindo uma filtração eficiente, livre de colmatação e capaz de reter mais de 99% das frações sólidas afluentes.

No âmbito econômico e logístico, os resultados obtidos foram contundentes. A estimativa orçamentária (CAPEX) revelou um custo de implantação de R\$ 184.500,00, valor que pode ser rapidamente equalizado pelas economias geradas pelas atuais práticas de saneamento do município. A desidratação da torta sobre o geotêxtil promoveu uma redução projetada de 96,5% no volume de massa a ser movimentada. Na prática, essa retração volumétrica elimina o dispendioso transporte de água intersticial e poupa aos cofres públicos a contratação de centenas de viagens de caminhões pesados por ciclo, reduzindo simultaneamente as despesas operacionais (OPEX) e as emissões de gases de efeito estufa.

Por fim, o estudo ratificou que a destinação do lodo desidratado para a indústria de cerâmica vermelha configura uma rota sustentável e viável para o Vale do Rio Pardo. A substituição parcial da argila natural pela torta do lodo consolida a transição da estação para a economia circular, transformando um resíduo de tratamento em matéria-prima secundária.

Como recomendação para trabalhos futuros e para a efetivação do projeto executivo, sugere-se a realização de ensaios laboratoriais contínuos de caracterização química, lixiviação e solubilização do lodo de Vera Cruz. Tais análises são indispensáveis para o rigoroso cumprimento das exigências ambientais e para a obtenção das licenças de operação junto aos órgãos competentes. Em suma, conclui-se que o uso de geossintéticos em leitos de drenagem moderniza a infraestrutura de saneamento municipal de forma robusta e econômica, encerrando o ciclo da água com responsabilidade ambiental e excelência em engenharia.

6. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004: Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15270-1: Componentes cerâmicos - Blocos e tijolos para alvenaria - Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

AZEVEDO NETTO, J. M. et al. Manual de Hidráulica. 8. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1998.

BAPTISTA, M.; LARA, M. Fundamentos de Engenharia Hidráulica. 2. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2003.

BORGES, Alberto de Campos. Topografia aplicada à engenharia civil. 3. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2013.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília: Presidência da República, 2010.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005. Brasília: Diário Oficial da União, 2011.

CAIXA ECONÔMICA FEDERAL. Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI). Relatórios de Insumos e Composições - Rio Grande do Sul. Brasília: CAIXA, 2026. Disponível em: <https://www.caixa.gov.br/poder-publico/modernizacao-gestao/sinapi/Paginas/default.aspx>. Acesso em: 04 de Julho de 2026.

CAPUTO, Homero Pinto. Mecânica dos Solos e suas Aplicações: Fundamentos. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015. v. 1.

CORDEIRO, J. S. Importância do Tratamento e Disposição Adequada dos Lodos de ETAS. In: REALI, M. A. P. (coord.). Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água. Rio de Janeiro: ABES, 1999. cap. 1, p. 1-20.

DAS, Braja M. Fundamentos de Engenharia Geotécnica. 7. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2011.

MCCORMAC, Jack C. Topografia. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

ORTIZ, I. G.; KELLNER, E.; ACHON, C. L. Avaliação da eficiência e do desaguamento de lodo de ETA em leitos de drenagem com aplicação de polímeros. Revista DAE, São Paulo, v. 72, n. 247, p. 1-15, 2024.

PORTO, R. M. Hidráulica Básica. 4. ed. São Carlos: EESC-USP, 2006.

PRUSKI, F. F. et al. Plúvio 2.1: chuvas intensas para o Brasil. Viçosa: UFV, 2006. (Software e manual técnico).

REALI, M. A. P. Principais Características Quantitativas e Qualitativas do Lodo de ETAS. In: REALI, M. A. P. (coord.). Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água. Rio de Janeiro: ABES, 1999. cap. 2, p. 21-40.

RICHTER, Carlos A. Tratamento de Lodos de Estações de Tratamento de Água. São Paulo: Edgard Blücher, 2001.

SANTOS, R. G. C. et al. Diminuição do volume de lodo de estação de tratamento de águas usando leito de drenagem. Revista Thema, v. 19, n. 1, p. 71-78, 2021.

SERVIÇO MUNICIPAL DE ÁGUA E ESGOTO SEMAE. Programa Protetor das Águas de Vera Cruz. Vera Cruz: SEMAE, 2021. 1 apresentação corporativa (64 slides), pdf.

SILVA, Irineu da; SEGANTINE, Paulo Cesar Lima. Topografia para engenharia: teoria e prática de geomática. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

TARTARI, R. et al. Aproveitamento de lodo de estação de tratamento de água (ETA) na fabricação de blocos cerâmicos. Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro, v. 16, n. 1, p. 79-84, 2011.

TUCCI, C. E. M. Hidrologia: Ciência e Aplicação. 4. ed. Porto Alegre: Ed. da UFRGS, 2013.

VEIGA, Luis Augusto Koenig; ZANETTI, Maria Aparecida Z.; FIRKOWSKI, Henrique. Fundamentos de Topografia. Curitiba: UFPR, 2007.

APÊNCICE A

Ponto	Coordenada E (X)	Coordenada N (Y)	Cota Z (m)	Descrição / Feição Mapeada

E01	5000.000	1000.000	100.000	E (Estação - Ponto Base)
E0	5009.015	1000.000	99.231	R (Ré - Orientação)
1	5009.761	1000.236	99.178	Ponto de Terreno
2	5005.190	996.791	99.019	Ponto de Terreno
3	5015.931	992.767	98.946	Ponto de Terreno
4	5011.354	990.862	99.198	Ponto de Terreno
5	5007.361	1001.765	99.502	TUBULA (Tubulação)
6	5006.371	1003.404	99.576	TUBULA (Tubulação)
7	5008.126	1004.445	99.595	TUBULA (Tubulação)
8	5009.097	1002.673	99.556	TUBULA (Tubulação)
9	5003.362	1019.097	100.329	TUBULA (Tubulação)
10	4998.832	1035.169	100.282	TUBULA (Tubulação)
11	4998.348	1050.918	100.848	TUBULA (Tubulação)
12	4999.005	1070.991	100.233	TUBULA (Tubulação)
13	5012.246	1012.158	100.196	ESTRADA (Acesso)
14	5013.742	1009.781	100.316	ESTRADA (Acesso)
15	5013.728	1009.787	99.766	ESTRADA (Acesso)
16	5031.828	1023.031	98.877	LAGOA2.6 (Cava Inoperante)
17	5038.009	1011.310	99.065	LAGOA2.6 (Cava Inoperante)
18	5041.700	1001.253	98.817	LAGOA# (Cava Inoperante)
19	5041.811	991.242	98.884	LAGOA# (Cava Inoperante)
20	5037.762	985.782	99.005	LAGOA# (Cava Inoperante)
21	5034.063	982.079	99.280	LAGOA# (Cava Inoperante)

22	5028.988	977.759	99.506	LAGOA# (Cava Inoperante)
23	5022.547	974.679	99.412	LAGOA# (Cava Inoperante)
24	5017.916	986.243	99.398	LAGOA# (Cava Inoperante)
25	5007.932	998.264	99.296	LAGOA# (Cava Inoperante)

APÊNDICE B

O acervo fotográfico integral (100 imagens) do levantamento técnico in loco encontra-se disponível para consulta em repositório digital através do link: [ACERVO REGISTROS FOTOGRÁFICOS](#)







