



HENRIQUE LIMA GONÇALVES

**ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DE PROCESSO DE
DRENAGEM DE SISTEMA TANQUE-BACIA DE
CONTENÇÃO**

HENRIQUE LIMA GONÇALVES

**ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DE PROCESSO DE
DRENAGEM DE SISTEMA TANQUE-BACIA DE
CONTENÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Colegiado de Curso da Engenharia Química
do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da
Universidade Federal do Maranhão, como parte
dos requisitos para obtenção do diploma de
Graduação em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Carlos Daltro de Freitas

São Luís
2025

Lima Gonçalves, Henrique.

Análise e Dimensionamento de Processo de Drenagem de Sistema Tanque-Bacia de Contenção / Henrique Lima Gonçalves. - 2025.

63 p.

Orientador(a): Antônio Carlos Daltro de Freitas.

Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2025.

1. Análise. 2. Dimensionamento. 3. Contenção. 4. Drenagem. 5. Chuva. I. Daltro de Freitas, Antônio Carlos. II. Título.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. ANTONIO CARLOS DALTRO DE FREITAS
Orientador – DEEQ/UFMA

Prof. Dr. VALTER NUNES TRINDADE JUNIOR
DEEQ/UFMA

Eng. GABRIEL VITOR DE SOUZA SILVA
RD ENGENHARIA LTDA/MA

07 de agosto de 2025

DADOS CURRICULARES

Henrique Lima Gonçalves

NASCIMENTO	01/02/2001 – SANTA MARIA DO PARÁ / PA
FILIAÇÃO	Antônio Flávio Maciel Gonçalves Marnilce da Silva Lima
2019/2025	Curso de Graduação Engenharia Química - Universidade Federal do Maranhão

*Dedico este trabalho aos meus pais e ao meu avô,
com os quais pude contar com tudo durante meu
processo de graduação.*

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço à minha família, em especial meus pais e meu avô, por me apoiarem e incentivarem durante toda minha jornada de graduação.

Ao meu orientador, Prof. Antônio, pelo incentivo, orientação e auxílio.

Aos meus amigos Cris, Daniela, Ítalo, Carol e Lorena que estiveram presentes nos momentos alegres e tristes, sendo fonte contínua de apoio e incentivo.

À RD ENGENHARIA LTDA., pela participação em um dos projetos de processos de drenagem e pela permissão de uso de alguns dados de projeto.

*“Time present and time past
Are both perhaps present in time future,
And time future contained in time past.
If all time is eternally present
All time is unredeemable.
What might have been is an abstraction
Remaining a perpetual possibility
Only in a world of speculation.”*

T. S. Eliot

GONÇALVES, Henrique Lima. **Análise e Dimensionamento de Processo de Drenagem de Sistema Tanque-Bacia de Contenção**. 2025. 63. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Química do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2025.

RESUMO

Sistemas de contenção desempenham um arranjo de extrema importância nas indústrias de processamento, que vão desde o isolamento de produtos contaminantes, como soda cáustica, até o controle de grandes volumes de fluidos. Sendo assim, a análise e o dimensionamento desses sistemas têm papel fundamental ao fornecer medidas e parâmetros de segurança que asseguram um bom funcionamento de toda uma planta química. Nesse contexto, a previsão de quantidades de volume de chuva e as dimensões das estruturas utilizadas para seu manejo são imprescindíveis para garantir que o sistema não venha a colapsar, considerando um cenário de uma empresa da área de extração e refino de minério, atuante no estado do Pará. Dessa forma, neste trabalho pretende-se realizar a previsão do volume de afluente decorrente de chuvas com períodos de retorno de 25, 1000 e 10000 anos, ao passo em que será dimensionado poços e canaletas para a área de contenção que contém um tanque de armazenamento de soda cáustica e para uma casa de bombas, com o intuito de prevenir possíveis vazamentos e danos de ordem ambiental. Para isso, fez-se uso da equação de Otto Pfafstetter sobre índices pluviométricos e das equações de balanço de massa para o dimensionamento das estruturas de drenagem. A simulação hidrológica apresentou grandes quantidades de volume de chuva, que vão desde 35402,6 m³ para a chuva de 25 anos, até 96023,7 m³, para a de 10000 anos. Diante disso, foi visível a necessidade da implementação de poços de armazenamento e do uso de bombas, e da substituição das antigas canaletas, que precisaram de reajustes em suas alturas em mais de 20 cm. Os resultados obtidos pelo presente trabalho demonstraram a necessidade da previsão meteorológica ao se construir áreas de contenção, além de acrescer estudos acerca do dimensionamento de estruturas de drenagem.

Palavras-chave: Análise. Dimensionamento. Contenção. Drenagem. Chuva.

GONÇALVES, Henrique Lima. **Analysis and Sizing of the Drainage Process of a Containment Tank-Basin System**. 2025. 63 f. Graduate Work (Graduate in Chemical Engineering) – Curso de Engenharia do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2025.

ABSTRACT

Containment systems play a highly important role in processing industries, ranging from the isolation of contaminating products, such as caustic soda, to the control of large volumes of fluids. Thus, the analysis and sizing of these systems are crucial, providing safety measures and parameters that ensure the proper functioning of an entire chemical plant. In this context, the prediction of rainfall volumes and the dimensions of the structures used to manage them are essential to ensure that the system does not collapse, considering the scenario of a mining extraction and refining company operating in the state of Pará. Therefore, this study aims to predict the inflow volume resulting from rainfall with return periods of 25, 1000, and 10,000 years, while also sizing wells and channels for the containment area that houses a caustic soda storage tank and a pump house, with the goal of preventing potential leaks and environmental damage. For this, Otto Pfafstetter's equation on rainfall indices and mass balance equations were used for the sizing of drainage structures. The hydrological simulation showed large volumes of rainfall, ranging from 35,402.6 m³ for the 25-year rainfall event to 96,023.7 m³ for the 10,000-year event. As a result, the need for the implementation of storage wells and the use of pumps, as well as the replacement of old channels, was evident, requiring adjustments to their heights by more than 20 cm. The results obtained in this study demonstrated the importance of weather forecasting when constructing containment areas, in addition to emphasizing further studies on the sizing of drainage structures.

Keywords: Analysis. Sizing. Containment. Drainage. Rain.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Disposição de um dique de contenção.	21
Figura 2 - Representação de um sistema de drenagem de água.	22
Figura 3 - Sistema de tanques para armazenagem de produtos químicos.	23
Figura 4 - Exemplo de um sistema de contenção.	25
Figura 5 - Geomembrana de PEAD alocada para isolamento de fluidos.	29
Figura 6 - Estrutura esquemática da construção da bacia de contenção.	34
Figura 7 - Disposição da casa de bombas em relação à área de contenção.	37
Figura 8 - Ilustração da área de contribuição conforme ABNT NBR 10844/1989.	38
Figura 9 - Região da casa de bombas que sofre influência pluviométrica.	39
Figura 10 - Sistema esquemático da localização das canaletas.	40
Figura 11 - Interface do Software Canalsoft.	41
Figura 12 - Dimensões adotadas para o poço de cenário de chuva de 25 anos.	48
Figura 13 - Dimensões adotadas para o poço de cenário de chuva de 1000 anos.	49
Figura 14 - Dimensões adotadas para o poço de cenário de chuva de 10000 anos.	50
Figura 15 - Dimensões adotadas para o poço da casa de bombas de cenário de chuva de 25 anos.	52
Figura 16 - Dimensões adotadas para o poço da casa de bombas de cenário de chuva de 1000 anos.	53
Figura 17 - Dimensões adotadas para o poço da casa de bombas de cenário de chuva de 10000 anos.	54
Figura 18 - Dimensões das canaletas do poço para o cenário de 25 anos.	55
Figura 19 - Dimensões das canaletas do poço para o cenário de 1000 anos.	55
Figura 20 - Dimensões das canaletas do poço para o cenário de 10000 anos.	56
Figura 21 - Dimensões das canaletas do poço para o cenário de 25 anos.	57
Figura 22 - Dimensões das canaletas do poço para o cenário de 1000 anos.	57
Figura 23 - Dimensões das canaletas do poço para o cenário de 10000 anos.	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados pluviométricos	32
Tabela 2 - Simulação hidrológica para a chuva com tempo de retorno de 25 anos.	44
Tabela 3 - Simulação hidrológica para a chuva com tempo de retorno de 1000 anos.	45
Tabela 4 - Simulação hidrológica para a chuva com tempo de retorno de 10000 anos.	47
Tabela 5 - Volume de água no poço de cenário de 25 anos.	48
Tabela 6 - Volume de água no poço de cenário de 1000 anos.	49
Tabela 7 - Volume de água no poço de cenário de 10000 anos.	50
Tabela 8 - Volume de água no poço de cenário de 25 anos.	51
Tabela 9 - Volume de água no poço de cenário de 1000 anos.	52
Tabela 10 - Volume de água no poço de cenário de 10000 anos.	52

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 OBJETIVOS	18
2.1 OBJETIVO GERAL.....	18
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1 HIDROLOGIA	19
3.2 DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE DRENAGEM.....	20
3.3 ARMAZENAMENTO E TRANSFERÊNCIA DE EFLUENTES INDUSTRIAIS	22
3.4 CONTROLE DE EFLUENTES E DIQUES DE CONTENÇÃO.....	24
3.5 BALANÇO DE ENERGIA E REAÇÕES QUÍMICAS	26
3.6 MATERIAS GEOSINTÉTICOS E MEMBRANAS	28
4 MATERIAL E MÉTODOS	31
4.1 SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA.....	31
4.2 DIMENSIONAMENTO DOS POÇOS LOCALIZADOS NA ÁREA DO DIQUE E NOSETOR DA CASA DE BOMBAS	35
4.2.1 Dimensionamento do poço interno ao dique	35
4.2.2 Dimensionamento do poço da casa de bombas	36
4.3 ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DE CANALETAS PARA O SISTEMA DE DRENAGEM	39
4.3.1 Análise e dimensionamento de canaletas para o sistema de drenagem interno à bacia de retenção.	39
4.3.2 Análise e dimensionamento de canaletas para o sistema de drenagem da casa de bombas.	42
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
5.1 SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA.....	43
5.1.1 Simulação hidrológica para chuva com tempo de retorno de 25 anos.	43
5.1.2 Simulação hidrológica para chuva com tempo de retorno de 1000 anos.	43
5.1.3 Simulação hidrológica para chuva com tempo de retorno de 10000 anos.	46
5.2 DIMENSIONAMENTO DOS POÇOS INTERNO AO DIQUE E DA CASA DE BOMBAS	46
5.2.1 Dimensionamento do poço da área do dique.....	46
5.2.2 Dimensionamento do poço da casa de bombas.	51

5.3 ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DAS NOVAS CANALETAS DA ÁREA DO DIQUE E DA CASA DE BOMBAS.....	54
5.3.1 Análise e dimensionamento de canaletas para o sistema de drenagem interno à bacia de retenção.	54
5.3.2 Análise e dimensionamento de canaletas para o sistema de drenagem da casa de bombas.	56
6 CONCLUSÃO.....	59
REFERÊNCIAS	61

1 INTRODUÇÃO

Materiais metálicos sempre desempenharam um papel fundamental no desenvolvimento da civilização humana, com uso que variou desde a confecção de armas de caça, como na distante Era do Bronze, até grandiosas engenhosidades espaciais, como sondas e foguetes, atualmente. Entre esses materiais, pode-se citar o alumínio como destaque por sua ampla aplicação na indústria moderna, graças à sua leveza, resistência à corrosão e versatilidade. Nesse contexto, na obtenção do alumínio metálico é necessário extrair previamente a alumina (óxido de alumínio) de minérios como a bauxita; e esse processo é realizado em refinarias, por meio de uma combinação de etapas químicas e eletrolíticas. A principal rota industrial utilizada atualmente para a produção de alumina é o Processo Bayer, responsável por cerca de 95% da produção mundial. Nesse processo, a bauxita é inicialmente moída e tratada com uma solução cáustica de hidróxido de sódio (NaOH), com concentração entre 3 e 5 mol/L, sob condições controladas de alta temperatura (entre 100 °C e 270 °C) e pressão (aproximadamente 4,6 MPa)(Duan et al., 2024).

Nesse sentido, o hidróxido de sódio, um dos principais reagentes utilizados na obtenção da alumina, é armazenado em tanques. Isso porque o armazenamento adequado de produtos químicos é essencial para garantir a segurança operacional, a integridade dos materiais e a eficiência dos processos industriais. Por ser uma substância altamente corrosiva, sua armazenagem exige cuidados específicos quanto ao material do recipiente, ao formato do tanque e às condições ambientais (Riddick, 2020). Assim, os tanques metálicos com formato cilíndrico são comumente utilizados para o armazenamento de NaOH por diversos motivos técnicos e práticos: em primeiro lugar, o formato cilíndrico oferece vantagens estruturais significativas, permitindo uma distribuição uniforme das tensões internas provocadas pelo peso do líquido armazenado, especialmente em tanques de grande volume. Isso reduz a concentração de esforços em pontos específicos e diminui o risco de falhas estruturais, aumentando a durabilidade e segurança do tanque. O uso de metais também confere maior resistência mecânica, o que é fundamental para estruturas de médio e grande porte, especialmente quando o armazenamento é feito a temperaturas elevadas ou com movimentação constante do líquido (Riddick, 2020). Segundo a Occupational Safety and Health Administration (OSHA, 29 CFR 1910.106), materiais e recipientes usados para armazenar substâncias corrosivas devem suportar tanto os efeitos químicos quanto as pressões internas provocadas pela expansão térmica dos líquidos.

Sendo assim, os tanques de armazenamento de soda cáustica são projetados para conter grandes volumes da solução, normalmente em concentrações entre 30% e 50%, e precisam ser construídos com materiais compatíveis (como aço inoxidável, ligas especiais ou materiais termoplásticos) para resistirem à corrosão química (“Oliveira RJ (Brazil). Lab. de Ensaios Nao Destrutivos Corrosao e Soldagem]” et al., 2008). No entanto, além da resistência do material, existe um aspecto igualmente crítico: o risco de vazamentos acidentais. Nesse contexto, há as chamadas áreas de contenção, também conhecidas como "bacias de contenção" ou “diques de contenção”. Essas estruturas são espaços delimitados ao redor dos tanques, geralmente construídas com barreiras de concreto ou outro material impermeável, cuja função é reter qualquer vazamento ou transbordamento acidental da substância armazenada, evitando que ela se espalhe para o solo, corpos d’água ou outras áreas da planta industrial. Sendo assim, existe uma interdependência: o tanque armazena o produto, enquanto a área de contenção atua como um sistema secundário de segurança (Fonseca, 2008b). Essa exigência é respaldada por normas técnicas e ambientais brasileiras, como a ABNT NBR 17505-4:2020 – Armazenamento de líquidos inflamáveis e combustíveis – Parte 4: Sistemas de contenção, que estabelece critérios para o dimensionamento e construção dessas áreas. Segundo essa norma, a capacidade da área de contenção deve ser de, no mínimo, 110% do volume do maior tanque individual, considerando também o volume deslocado por chuvas ou outros tanques presentes.

O volume de chuvas, por sua vez, também é levado em consideração, uma vez que pode se acumular em eventos climáticos. Essa diligência é feita porque, em caso de precipitação intensa, a água da chuva pode reduzir a capacidade útil da bacia de contenção, comprometendo sua função de reter vazamentos. Assim, a norma recomenda que o dimensionamento inclua o maior volume estimado de chuva para o local, considerando dados históricos pluviométricos, além da instalação de sistemas de drenagem ou bombeamento com controle ambiental. Posto isso, o volume de chuvas é um fator crítico no projeto de áreas de contenção, e seu cálculo adequado é indispensável para garantir conformidade com a legislação ambiental (como a Resolução CONAMA nº 430/2011) e a segurança das operações industriais.

Consoante a isso, porém, a simples contenção desses líquidos não é suficiente para assegurar a estabilidade de uma área de contenção e evitar impactos negativos ao meio ambiente. É nesse ponto que o sistema de drenagem exerce um papel fundamental, atuando de maneira complementar às áreas de contenção. A drenagem tem como principal função controlar o fluxo e a infiltração de líquidos, sejam eles provenientes da precipitação (água da chuva), do processo industrial ou de infiltrações internas nos maciços de contenção. Para isso, utiliza-se um conjunto de estruturas como poços de bombeamento, canaletas superficiais, drenos internos

(como drenos horizontais ou verticais), entre outros (CARVALHO et al., 2023). A correta concepção e dimensionamento dessas estruturas deve seguir diretrizes técnicas como as estabelecidas na ABNT NBR 11682:2009 (Estabilidade de Taludes) e ABNT NBR 8419 (Projeto de Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos). Esses dispositivos visam direcionar o fluxo de água de forma controlada, reduzindo a pressão poropressional nos materiais contidos, o que contribui significativamente para a estabilidade geotécnica das estruturas de contenção. Além disso, a drenagem adequada impede o transbordamento e a percolação indesejada de líquidos, protegendo o solo e os lençóis freáticos contra a contaminação, em conformidade com os princípios estabelecidos na Lei Federal nº 12.305/2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, e na Resolução CONAMA nº 430/2011, que trata do controle de lançamento de efluentes. Sendo assim, a relação entre áreas de contenção e sistemas de drenagem é de interdependência: a eficiência e segurança de uma área de contenção estão diretamente condicionadas à capacidade de seu sistema de drenagem em coletar, conduzir e, quando necessário, tratar os líquidos presentes. Em projetos sustentáveis e tecnicamente adequados, esses dois elementos são planejados em conjunto, garantindo o desempenho ambiental e a integridade estrutural ao longo do tempo, conforme preconizado pela ABNT NBR 13028:2017 (Projetos de sistemas de drenagem de águas pluviais) e pelas diretrizes da Agência Nacional de Mineração (ANM).

Dentro desse contexto, nesse trabalho será avaliada a capacidade atual de controle de efluentes de um dique de contenção pertencente a um tanque de armazenamento de soda cáustica 50% de uma empresa da área de produção de alumina situada na cidade de Barcarena, Pará. Será, ademais, dimensionado um novo sistema de drenagem relacionado à vazão de chuva proveniente da microrregião citada. Para tanto, será utilizado simulações hidrológicas, e também será trabalhado a análise e o dimensionamento de poços para o manejo de águas, assim como o do sistema de canaletas. Posto isso, com as informações originadas do desenvolvimento desse trabalho, será possível detalhar as formas que o controle de efluentes envolvendo áreas de contenção melhor deve ser manejado, assim expondo possíveis falhas e soluções para o sistema, contribuindo com informações que acrescem o estudo e a análise de sistemas de drenagem tanque-bacia de contenção.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a capacidade atual de controle de efluentes de um dique de contenção pertencente a um tanque de armazenamento de soda cáustica 50% de uma empresa da área de produção de alumina situada na cidade de Barcarena, Pará, e dimensionar um novo sistema de drenagem relacionado à vazão de chuva proveniente da microrregião citada.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Fazer uma simulação hidrológica a fim de determinar os volumes de água provenientes de uma chuva de tempo de retorno de 25, 1000 e 10.000 anos;
- Dimensionar poços para o manejo do volume de água proveniente do dique de contenção, com o intuito de evitar transbordo e contaminação, além de poços de armazenamento para uma casa de bombas localizada próxima ao dique para caso de entrada de chuva;
- Analisar e dimensionar novas canaletas, tanto para a área do dique quanto para o sistema de casa de bombas, para o escoamento seguro dos efluentes advindos do volume de chuvas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 HIDROLOGIA

A hidrologia é uma ciência fundamental dentro da engenharia, atuando na compreensão, quantificação e modelagem dos processos relacionados ao ciclo hidrológico, com destaque para a precipitação. Dentre os elementos analisados, o volume de chuva e sua distribuição no tempo e espaço são componentes críticos, influenciando diretamente o planejamento, o dimensionamento e a operação de sistemas hidráulicos e de drenagem urbana e rural. A análise da precipitação envolve inicialmente a medição da quantidade de água precipitada sobre uma determinada área (Colegiada et al., [S.d.]). Essa medição é comumente expressa em milímetros e permite o cálculo do chamado índice pluviométrico médio, que representa a profundidade média da chuva sobre uma bacia hidrográfica ou região de interesse. Esse cálculo pode ser realizado por métodos como a média aritmética simples, o método de Thiessen (que pondera as estações pluviométricas por área de influência) ou, ainda, por meio das isoietas, que consistem em linhas que ligam pontos de igual precipitação sobre mapas temáticos. A escolha do método adequado depende da distribuição e densidade das estações pluviométricas, bem como das características topográficas da área em estudo. Para além do volume total precipitado, a engenharia demanda a previsão de eventos extremos de chuva para o correto dimensionamento de obras hidráulicas, como bueiros, canais de drenagem e reservatórios de retenção. Para isso, utiliza-se a relação estatística entre a intensidade da chuva, sua duração e a frequência de ocorrência, representada pelas equações de intensidade-duração-frequência (IDF). Essas equações são formuladas com base em séries históricas de dados pluviométricos e permitem estimar a intensidade média de uma chuva com determinada duração e período de retorno (Back, 2020). No contexto brasileiro, destaca-se a contribuição de Otto Pfafstetter, que desenvolveu modelos IDF para diversas regiões do país com base em dados de 98 postos pluviográficos. A equação por ele proposta é expressa matematicamente como:

$$I = T^{(\alpha + \frac{\beta}{T^{0,25}})} [at + b \log(1 + ct)] \quad (1)$$

Onde:

- I: intensidade da chuva;
- t: duração da chuva;
- a, b e c: coeficientes empíricos ajustados a cada localidade;
- α e β : coeficientes que dependem da duração da chuva e da localidade.

Tais parâmetros são obtidos por análise estatística, as quais consistem em ajustar uma equação empírica aos dados históricos de chuvas máximas, usando regressão estatística para determinar os coeficientes que melhor representam a relação entre intensidade, duração e frequência. Eles também devem considerar séries de dados suficientemente longas para garantir confiabilidade. A aplicação adequada da equação IDF é essencial para assegurar o desempenho hidráulico das infraestruturas frente a diferentes cenários de precipitação, principalmente os de curta duração e alta intensidade, que são os mais críticos em zonas urbanas (Naghetini; Pinto, 2007). Outro aspecto relevante no campo hidrológico é a organização das bacias hidrográficas por meio de codificações hierárquicas, como a "ottocodificação", também desenvolvida por Otto Pfafstetter. Esse sistema atribui códigos numéricos que indicam a posição relativa de uma bacia dentro da rede hidrográfica, permitindo uma leitura sistemática e integrada da hierarquia entre bacias e sub-bacias. Tal abordagem é amplamente adotada em bases cartográficas e bancos de dados hidrológicos, sendo essencial para a gestão de recursos hídricos e o planejamento territorial em escala regional e nacional (Naghetini; Pinto, 2007). Com isso, os estudos hidrológicos baseados na análise de índices pluviométricos e equações IDF, aliados ao conhecimento estruturado da rede hidrográfica, representam ferramentas indispensáveis na engenharia moderna. Elas subsidiam decisões técnicas fundamentais para a segurança de obras, prevenção de alagamentos, controle de cheias e conservação dos recursos naturais, promovendo o desenvolvimento sustentável em diferentes contextos territoriais (Chen, 1983).

3.2 DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE DRENAGEM

A gestão eficiente dos efluentes industriais e a implementação de diques de contenção, por sua vez, são componentes cruciais na engenharia para mitigar os impactos ambientais decorrentes das atividades industriais. Essas práticas estão intrinsecamente ligadas à hidrologia, pois influenciam diretamente o ciclo hidrológico local e a qualidade dos recursos hídricos, isso porque a relação entre hidrologia e o controle de efluentes industriais é evidente, uma vez que as precipitações pluviais podem influenciar significativamente o volume e a concentração dos efluentes (Naghetini; Pinto, 2007). Chuvas intensas podem causar transbordamentos em sistemas de contenção, levando ao lançamento de poluentes nos corpos d'água e no solo. Portanto, é fundamental considerar os dados hidrológicos, como o índice pluviométrico e as equações de intensidade-duração-frequência (IDF), no dimensionamento e na operação desses sistemas. Nesse sentido, o controle de efluentes industriais envolve a coleta, tratamento e

disposição adequada dos resíduos líquidos gerados pelas indústrias. Esse processo é essencial para prevenir a contaminação de corpos d'água e proteger os ecossistemas aquáticos. As técnicas de tratamento variam conforme a natureza dos efluentes, podendo incluir processos físicos, químicos e biológicos. A escolha do método adequado depende das características específicas dos efluentes e dos padrões de qualidade exigidos para o lançamento nos corpos receptores (Giordano, 2004a). Os diques de contenção, por sua vez, são estruturas projetadas para confinar líquidos perigosos, como produtos químicos e efluentes industriais, prevenindo vazamentos e derramamentos acidentais. Essas barreiras físicas são dimensionadas considerando fatores como volume armazenado, características do terreno e condições climáticas locais. Além disso, devem ser construídas com materiais resistentes à corrosão e impermeáveis, garantindo a integridade estrutural e a eficácia na contenção dos líquidos (De Amorim; De Andrade Pereira, 2008). A Figura 1 expressa como geralmente um dique de contenção é.

Figura 1 - Disposição de um dique de contenção.



Fonte: <https://goiasimpermeabilizacoes.com.br/construcao/bacia-de-contencao-para-que-serve-e-como-ela-e-feita/>.

A implementação de sistemas de drenagem adequados é, também, essencial para controlar o escoamento superficial e evitar a sobrecarga dos sistemas de contenção; canais, valas e poços de infiltração podem ser utilizados para direcionar e infiltrar o excesso de água, reduzindo o risco de transbordamentos. Além disso, a manutenção regular desses sistemas é crucial para garantir seu funcionamento eficiente e prevenir falhas estruturais (Tucci; Collischonn, 1998). A figura 2 expõe como um sistema de drenagem é instalado.

Figura 2 - Representação de um sistema de drenagem de água.



Fonte: <https://www.rgsengenharia.com.br/blog/drenagem-urbana-entenda-o-que-e-e-sua-importancia>.

A legislação ambiental brasileira estabelece diretrizes para o controle de efluentes industriais e a construção de diques de contenção. A Resolução CONAMA nº 430/2011, por exemplo, dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes em corpos d'água, exigindo que as indústrias adotem medidas para prevenir a poluição hídrica. Além disso, normas técnicas, como a ABNT NBR 12216:1992, fornecem orientações para o projeto e a construção de sistemas de contenção de líquidos perigosos. Dito isso, o controle eficaz dos efluentes industriais e a implementação de diques de contenção são práticas essenciais na engenharia para proteger os recursos hídricos e garantir a sustentabilidade ambiental. A integração dessas medidas com os estudos hidrológicos permite o desenvolvimento de soluções mais eficientes e resilientes, capazes de enfrentar os desafios impostos pelas variabilidades climáticas e pelas atividades industriais.

3.3 ARMAZENAMENTO E TRANSFERÊNCIA DE EFLUENTES INDUSTRIAIS

No que tange o armazenamento e a transferência de efluentes industriais, sua constituição se traduz em etapas críticas dentro do sistema de gerenciamento de resíduos líquidos nas unidades produtivas. Tais etapas demandam não apenas soluções técnicas robustas, mas também alinhamento normativo, segurança operacional e integração com o contexto hidrológico regional previamente discutido. O armazenamento de efluentes é comumente realizado em tanques de contenção primária, os quais devem ser projetados segundo parâmetros

que levem em consideração a composição físico-química dos resíduos, o volume gerado em função do ciclo produtivo e o tempo de retenção necessário antes do tratamento ou descarte. Esses tanques, em sua maioria, são metálicos ou confeccionados com polímeros reforçados, como o polietileno de alta densidade (PEAD), dada sua elevada resistência química e térmica (Araújo et al., 2016). Na Figura 3, é exemplificado um sistema de tanques para armazenamento de produtos químicos.

Figura 3 - Sistema de tanques para armazenagem de produtos químicos.



Fonte: <https://www.cipam.com.br/tanque-armazenar-soda-caustica>.

Além disso, devem estar inseridos em áreas de contenção secundária, e elas necessitam ter volume capaz de conter no mínimo 110% do volume total armazenado, conforme dispõe a ABNT NBR 17505-1:2013 e o Manual de Gerenciamento de Resíduos da CETESB (2021). Em complemento, o sistema de transferência dos efluentes — responsável por conduzir os resíduos líquidos do ponto de geração até o armazenamento ou o tratamento — requer o dimensionamento criterioso de bombas centrífugas ou de deslocamento positivo, conforme a viscosidade, densidade e comportamento reológico do fluido. A definição do arranjo hidráulico deve considerar a altura manométrica total (HMT), as perdas de carga distribuídas e localizadas e a frequência de operação, para garantir a eficiência energética e a longevidade do sistema. Neste contexto, o aspecto hidrológico adquire relevância especial. Regiões com altos índices

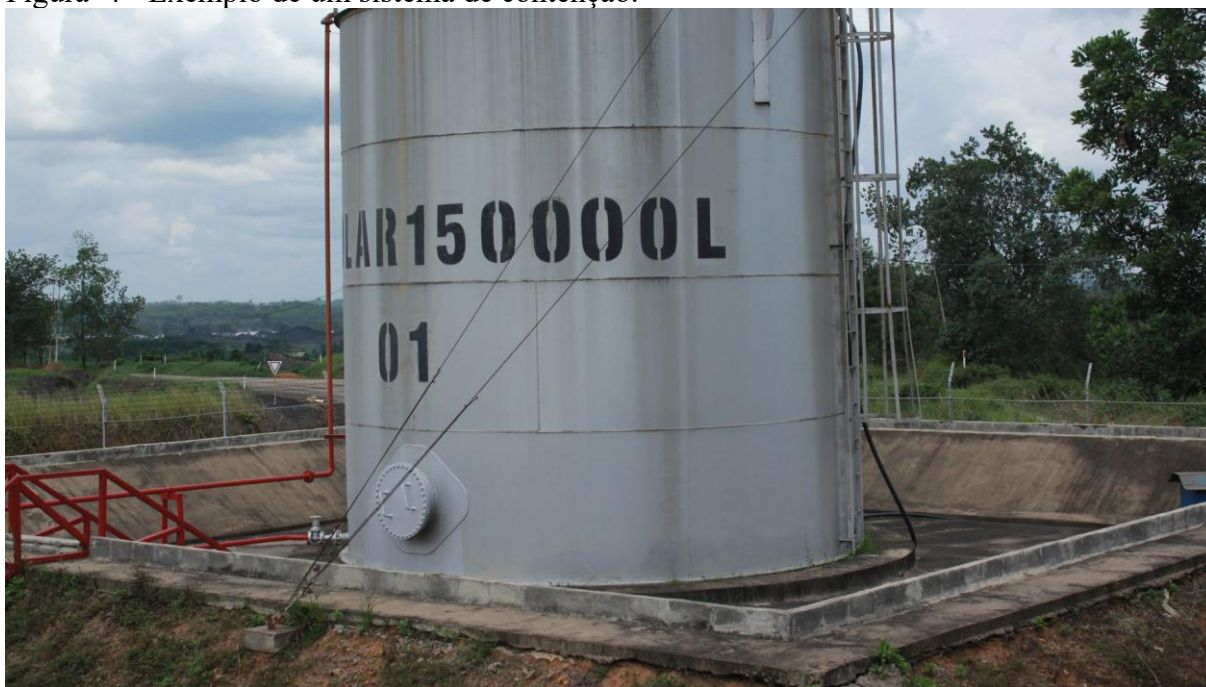
pluviométricos exigem atenção redobrada quanto à drenagem de áreas de contenção e à impermeabilização do solo, para evitar o percolamento de contaminantes no lençol freático (Giordano, 2004b). A aplicação da equação de Otto Pfafstetter e de curvas IDF (Intensidade–Duração–Frequência) é fundamental na fase de projeto para estimar o volume máximo de precipitação e garantir que o sistema suporte eventos críticos com tempo de retorno mínimo de 25 anos, como preconiza a Resolução CONAMA nº 430/2011 e os estudos hidrológicos consolidados por Tucci (2017). Dessa forma, os sistemas de bombeamento e armazenamento devem estar integrados a uma rede de canaletas, poços de inspeção e bacias de contenção, permitindo o escoamento controlado em caso de sobrecarga por eventos pluviométricos extremos. Além disso, sensores de nível e sistemas de automação podem ser acoplados às unidades de bombeamento para monitoramento remoto e respostas automáticas a variações bruscas no sistema. Assim, a interface entre engenharia de processos, engenharia hidráulica e normas ambientais garante, portanto, que as etapas de armazenamento e bombeamento de efluentes operem de forma segura e ambientalmente responsável, minimizando riscos operacionais e impactos negativos aos corpos hídricos receptores (Metcalf; Eddy, 2015).

3.4 CONTROLE DE EFLUENTES E DIQUES DE CONTENÇÃO

No que se refere à abordagem integrada da gestão de efluentes industriais no contexto da engenharia moderna, é essencial analisar o controle de efluentes e a implementação de estruturas de contenção, como diques e bacias, cuja função se estende além da simples armazenagem, desempenhando papel estratégico na prevenção de acidentes ambientais e na integração com o regime hidrológico local. O controle de efluentes deve ser entendido como um conjunto de medidas preventivas, operacionais e estruturais destinadas a garantir que os resíduos líquidos gerados pelas atividades industriais sejam devidamente contidos, monitorados e tratados antes de sua disposição final (Dezotti, 2008). Esse controle envolve desde o mapeamento de pontos críticos de geração e vazamento, até a instalação de dispositivos de contenção primária e secundária, que atuam sinergicamente para evitar a liberação descontrolada de contaminantes no ambiente (Giordano, 2004b). Dentre os dispositivos estruturais, os diques de contenção merecem destaque. Essas estruturas perimetrais são projetadas para reter vazamentos acidentais de tanques de armazenamento ou tubulações, funcionando como uma barreira física de segurança. Os diques são construídos com materiais como concreto armado, alvenaria ou solo compactado revestido com geomembranas, de modo a garantir estanqueidade e durabilidade frente à natureza corrosiva dos efluentes (Fonseca,

2008a). De acordo com a ABNT NBR 17505-2, o volume útil dos diques deve ser, no mínimo, igual ao do maior tanque contido na área, acrescido de uma margem de segurança considerando precipitações pluviométricas intensas. Conforme expõe a Figura 4, uma área de contenção para controle de produtos químicos normalmente é composta por uma bacia de contenção e um sistema a ser contido: nesse caso, um tanque.

Figura 4 - Exemplo de um sistema de contenção.



Fonte: <https://fibersals.com.br/blog/bacia-de-contencao-de-oleo-diesel/>.

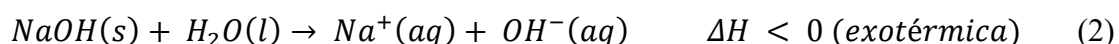
Esse aspecto, por sua vez, reforça a interconexão entre hidrologia e engenharia de contenção. Para o dimensionamento adequado das estruturas, é imprescindível considerar dados históricos de volume de chuvas, utilizando modelos como a equação de Otto Pfafstetter para previsão do volume pluviométrico crítico, além das curvas IDF para cálculo do tempo de resposta necessário em eventos extremos. A partir desses dados, projeta-se a capacidade da bacia de contenção ou do dique, garantindo que eles mantenham sua eficiência mesmo durante chuvas com tempo de retorno superior a 25 anos — critério geralmente adotado em projetos industriais de médio e grande porte (Galvão; Meneses, 2005). A impermeabilização da base dos diques e bacias com geossintéticos, como geomembranas de PEAD, é outra medida fundamental. Esses materiais evitam a infiltração de contaminantes no solo e na água subterrânea, atendendo às exigências da Resolução CONAMA nº 430/2011, que determina a prevenção à poluição difusa em corpos hídricos receptores. Em sistemas mais avançados, sensores de vazamento e sistemas de drenagem internos são acoplados à estrutura para proporcionar redundância e monitoramento contínuo. Outro ponto relevante é o escoamento

controlado das águas pluviais incidentes sobre áreas de contenção. A drenagem superficial deve ser planejada de modo a impedir o acúmulo excessivo de água nas bacias, o que poderia comprometer sua capacidade de retenção em caso de emergência. Nesses casos, dispositivos como vertedores controlados, canaletas revestidas e caixas de contenção com válvulas de bloqueio automático são incorporados ao projeto. Além da função emergencial, essas estruturas desempenham papel estratégico no processo de separação de fases, permitindo a decantação de sólidos e a segregação de óleos ou compostos orgânicos que possam ser posteriormente encaminhados ao sistema de tratamento. Esse pré-tratamento físico-químico inicial reduz significativamente a carga poluente e melhora a eficiência das etapas posteriores, como as estações de tratamento de efluentes (ETEs) (Canholi, 2015).

3.5 BALANÇO DE ENERGIA E REAÇÕES QUÍMICAS

No contexto das operações industriais modernas, o conhecimento detalhado dos fenômenos físico-químicos associados às matérias-primas e aos insumos utilizados nos processos é fundamental para garantir a segurança, a eficiência e a sustentabilidade das atividades. As reações químicas que ocorrem durante o manuseio, processamento ou descarte de substâncias industriais, além de transformarem materiais, também envolvem trocas de energia térmica com o meio — o que pode resultar em elevações de temperatura, mudanças de fase ou liberação de gases (Pastre et al., 2012). Nesse cenário, o estudo do balanço de energia associado a essas transformações torna-se essencial, especialmente em ambientes onde substâncias corrosivas ou altamente reativas são utilizadas, como é o caso do hidróxido de sódio (NaOH). A engenharia de processos se apoia nos princípios da termodinâmica e da cinética química para modelar e prever o comportamento das reações envolvidas nas operações industriais. O primeiro princípio da termodinâmica, que trata da conservação da energia, é frequentemente aplicado em plantas químicas para realizar o balanço energético de reatores, tanques, trocadores de calor e linhas de transporte de fluido. Nesses sistemas, a energia interna de um volume de controle pode variar em função do trabalho realizado, da transferência de calor e da energia gerada ou absorvida em reações químicas (Afonso, 2012). Um tipo específico de reação que merece atenção é a dissolução, processo amplamente presente na indústria, tanto na preparação de soluções reativas quanto no tratamento de resíduos. Essas dissoluções, embora frequentemente interpretadas como fenômenos puramente físicos, envolvem interações moleculares intensas, capazes de gerar variações térmicas significativas. A dissolução de compostos iônicos altamente solúveis, como sais alcalinos, é particularmente relevante nesse

contexto. Dentre essas substâncias, destaca-se o hidróxido de sódio (NaOH) — um dos reagentes mais utilizados em diversas indústrias, como na produção de alumina (via processo Bayer), na fabricação de papel, na indústria petroquímica e no tratamento de efluentes. O NaOH é altamente higroscópico e se dissolve de forma extremamente rápida em água, liberando grande quantidade de calor (Pereira; De Oliveira, 2025). A reação pode ser representada pela equação termoquímica simplificada (Equação 2):



Neste processo, o sólido se dissocia em íons na solução aquosa, e esses íons se hidratam — um fenômeno que envolve a reorganização das moléculas de água ao redor das espécies carregadas. A energia liberada durante a hidratação dos íons Na^+ e OH^- é superior à energia necessária para quebrar as ligações no cristal de NaOH, resultando em um balanço energético negativo. Isso pode elevar a temperatura da solução a valores superiores a 90 °C, mesmo em sistemas sem fonte externa de aquecimento (Pereira; De Oliveira, 2025). Do ponto de vista de engenharia, essa elevação térmica não é um mero detalhe operacional, mas um fator crítico no projeto de tanques de dissolução, linhas de bombeamento e sistemas de armazenamento. A dissipação inadequada dessa energia térmica pode resultar em trincas por choque térmico, falhas de vedação, corrosão acelerada ou até acidentes industriais. Por esse motivo, tanques utilizados para esse fim costumam ser dotados de sistemas de agitação, recirculação e, em alguns casos, trocadores de calor que permitam controlar a temperatura durante a preparação da solução cáustica (Afonso, 2012). Adicionalmente, o calor liberado pode interferir com sistemas de contenção e drenagem; em caso de derramamento de NaOH durante a etapa de dissolução, o contato com a água de chuva captada por bacias de contenção pode intensificar a reação exotérmica e, com isso, comprometer a integridade dos materiais da bacia, provocar o desprendimento de vapores alcalinos e alterar bruscamente o pH das águas captadas. Essa situação pode, inclusive, afetar os cálculos hidrológicos relacionados ao tempo de escoamento e capacidade volumétrica da bacia, pois o aumento de temperatura altera a viscosidade do líquido e, por consequência, seu comportamento hidráulico. Além disso, quando se considera a disposição ou tratamento desses efluentes, o histórico térmico da solução deve ser incluído na análise energética total do sistema (Braga, 2010). Em plantas industriais com abordagem de eficiência energética integrada, as reações exotérmicas como a dissolução de NaOH podem ser aproveitadas para pré-aquecer outros insumos, contribuindo para a economia de energia térmica na planta (Afonso, 2012).

3.6 MATERIAS GEOSSINTÉTICOS E MEMBRANAS

Dentre os elementos fundamentais para garantir a segurança ambiental e operacional no contexto de armazenamento e manejo de efluentes industriais, os materiais geossintéticos destacam-se como soluções técnicas eficazes para o revestimento de bacias de contenção, tanques, canais de drenagem, áreas de disposição de resíduos e reatores de neutralização química. Esses materiais têm sido amplamente empregados na engenharia moderna devido à sua versatilidade, durabilidade química, resistência mecânica e excelente desempenho hidráulico, especialmente quando expostos a ambientes agressivos, como soluções alcalinas altamente concentradas — a exemplo das que contêm hidróxido de sódio (NaOH) (Müller; Saathoff, 2015). Os geossintéticos compreendem uma família de produtos poliméricos, dentre os quais se destacam geomembranas, geotêxteis, geocompostos e geonets. Cada um desses materiais pode ser utilizado de maneira específica, dependendo da natureza do fluido a ser contido, das cargas envolvidas e do tipo de solo ou estrutura onde será aplicado. No caso particular do revestimento de bacias de contenção e sistemas de drenagem associados a tanques de produtos químicos, como os que armazenam soluções de NaOH, o uso de geomembranas de polietileno de alta densidade (PEAD) é amplamente consolidado. Essas geomembranas apresentam elevada resistência à tração, excelente estabilidade térmica, alta impermeabilidade e notável resistência química, sendo compatíveis com soluções cáusticas, ácidas, salinas ou contendo metais pesados (Scheirs, 2009). O PEAD pode resistir por décadas à exposição a efluentes industriais agressivos, desde que corretamente especificado quanto à espessura, aditivos antioxidantes e condições de instalação. A Figura 5 mostra a disposição e locação de uma manta protetora em um sistema de segurança de efluentes.

Figura 5 - Geomembrana de PEAD alocada para isolamento de fluidos.



Fonte: <https://brasilgeomembrana.com.br/sem-categoria/geomembrana-pead-e-todas-as-suas-informacoes-de-uso/>.

Do ponto de vista hidrológico, a aplicação de materiais geossintéticos em estruturas de contenção está diretamente relacionada à capacidade de isolamento do solo e à prevenção da percolação de líquidos contaminantes no subsolo, minimizando o risco de contaminação de lençóis freáticos e aquíferos. Isso complementa os sistemas de drenagem superficial e de controle de cheias, funcionando como uma barreira física e química integrada ao planejamento hidráulico da planta industrial. Além disso, os geossintéticos podem ser incorporados a sistemas multicamadas, onde se combinam, por exemplo, uma geomembrana impermeável com um geotêxtil de proteção, que atua como camada de amortecimento para proteger a membrana contra perfurações por objetos pontiagudos presentes no solo ou na base da bacia (Van Santvoort, 1994). Em outras configurações, são utilizados geocompostos de drenagem, que combinam as propriedades de condução hidráulica de geonets com a filtragem seletiva de geotêxteis, permitindo o direcionamento eficiente de lixiviados ou águas pluviais para sistemas de coleta e tratamento. A escolha adequada do tipo de geossintético, sua espessura, método de instalação (por soldagem térmica ou aplicação de ancoragens mecânicas), bem como os protocolos de inspeção e monitoramento pós-instalação, são fatores cruciais para garantir a integridade do sistema ao longo do tempo (Geroto; Rebelo; Vilar, 2008). Conforme descrito na ABNT NBR 12553 (Geossintéticos – Terminologia) e na ABNT NBR 16199 (Projeto e execução de sistemas de impermeabilização com geomembranas), esses materiais devem ser especificados com base em critérios técnicos rigorosos, levando em conta as cargas hidráulicas,

as condições térmicas, a agressividade química do efluente e os requisitos de durabilidade da aplicação. No contexto abordado em projetos de drenagem de sistemas tanque-bacia de contenção, onde se discutem reações exotérmicas de dissolução (como a de NaOH), sistemas de drenagem de emergência, e a necessidade de proteger estruturas de contenção contra agressões térmicas e químicas, os geossintéticos oferecem soluções otimizadas de engenharia de barreiras, promovendo a sustentabilidade, a segurança operacional e a conformidade com legislações ambientais (Van Santvoort, 1994).

4 MATERIAL E MÉTODOS

De imediato, é válido situar que, para atender a todos os objetos propostos na análise e no dimensionamento do sistema, o presente projeto se moldou em apresentar as condições e soluções técnicas para a adaptação de um tanque, de modo que este passe a armazenar soda cáustica a 50%; além disso, no desenvolvimento dos métodos cabíveis ao projeto, será avaliado o sistema de drenagem da área, incluindo toda a infraestrutura necessária, como poços, diques e canaletas, visando garantir a operação segura e eficiente do terminal e a proteção ambiental. Para tal, alguns pressupostos foram feitos:

1. O tempo de recorrência de chuva adotada será de 25, 1000 e 10.000 anos, os quais se referem à probabilidade de a chuva ocorrer. A chuva de 25 anos possui uma probabilidade de 4%, enquanto as de 1000 e 10000 possuem 0,1% e 0,01%, respectivamente;
2. O coeficiente de escoamento superficial adotado será de $C = 0,85$;
3. Será aplicada a Regra da Bota para calcular a lâmina máxima na casa de bombas, conforme critério interno da empresa. Esta regra envolve a determinação de uma profundidade máxima para os pisos das áreas de processo, garantindo que os operadores possam acessá-las com segurança utilizando apenas botas de proteção, caso haja um eventual transbordamento de material contaminado;
4. A profundidade máxima, medida entre o topo da mureta mais baixa e o topo do poço de drenagem mais baixo, deve ser de 300 mm. Considerando que as botas de segurança possuem uma altura de cano longo de 350 mm, esse valor proporciona uma margem de segurança adequada para os operadores;
5. O dique contará com uma bomba de poço para direcionar os efluentes para um outro sistema de alocação. O poço também será revestido com chapas de proteção, garantindo uma contenção eficaz e segura dos efluentes.
6. Em casos de colapso do tanque, o dique conterà a soda e posteriormente será drenada por caminhões.

4.1 SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA

Na simulação hidrológica, foi tido como critério de segurança que o sistema a ser analisado seria resistente a uma quantidade muito considerável de volume de chuva. Sendo assim, a simulação levará em consideração chuva com tempo de retorno de até 10.000 anos.

Posto isso, o índice pluviométrico, calculado pela equação de Otto Pfafstetter, é dado pela Equação 1 mencionada de antemão:

$$I = T^{(\alpha + \frac{\beta}{T^{0,25}})} [at + b \log(1 + ct)] \quad (1)$$

Onde:

- I: intensidade da chuva ou índice pluviométrico (mm/h);
- t: duração da chuva (h)
- T: tempo de recorrência (anos);
- a , b e c : coeficientes empíricos ajustados a cada localidade.
- α e β : coeficientes que dependem da duração da chuva e da localidade.

No que diz respeito aos coeficientes empíricos, esses foram retirados a partir do estudo de Otto Pfafstetter de Chuvas Intensas no Brasil (1956). Os valores de a , b e c adotados são, considerando a região em questão, 0,4, 31 e 20, respectivamente. Os parâmetros α e β variam conforme tempo. A Tabela 1 expressa os valores desses coeficientes a depender do tempo analisado.

Tabela 1 - Dados pluviométricos

t	5 min	15 min	30 min	1 h	2 h	4 h	8 h	14 h	24 h
α	0,108	0,122	0,138	0,156	0,166	0,174	0,176	0,174	0,170
β	-0,04	0,00	0,00	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04

Fonte: Adaptado de Chuvas Intensas no Brasil (1956).

Ademais, para a construção da simulação, também foi considerada a vazão de chuva, assim como o volume de entrada, isto é, o volume de chuva que adentra o sistema, e o volume de saída, ou seja, o volume que a bomba retira.

O volume de chuva pode ser calculado através da Equação 2.

$$Q = \frac{C \cdot I \cdot A}{1000} \quad (2)$$

Onde:

- Q: vazão de chuva (m³/h);
- C: coeficiente de escoamento superficial (adimensional);
- I: intensidade da chuva (mm/h);
- A: área de contribuição da bacia (m²).

O coeficiente de escoamento superficial leva em consideração que nem todo escoamento de fato se torna um escoamento superficial, levando em consideração a evaporação e a infiltração no solo. Nesse contexto, o valor adotado para o coeficiente será de 0,85.

O volume de entrada, por sua vez, é dado pela Equação 3.

$$Ve = Q \times t \quad (3)$$

Onde:

- V_e : volume de entrada no sistema (m^3);
- Q : vazão de chuva (m^3/h);
- t : duração da chuva (h).

Por fim, o volume de saída é explícito na Equação 4.

$$V_s = Q_b \times t \quad (4)$$

Onde:

- V_s : volume de saída do sistema (m^3);
- Q_b : vazão da bomba (m^3/h);
- t : duração da chuva (h).

O fator que relaciona o volume de entrada e o volume bombeado é dado pelo Volume acumulado, exposto pela Equação 5.

$$V_a = V_e - V_s \quad (5)$$

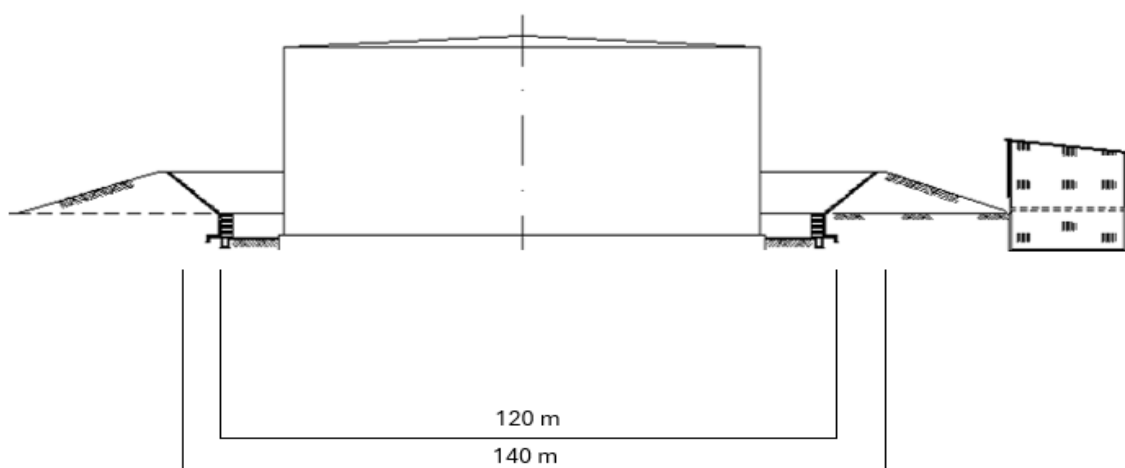
Onde:

- V_a : volume acumulado (m^3);
- V_e : volume de entrada (m^3);
- V_s : volume de saída ou volume bombeado (m^3).

A área de contribuição da bacia e a vazão da bomba, requeridos no cálculo dos volumes, foram obtidos através de informações de projeto referentes à Adaptação do tanque de Armazenamento.

No que diz respeito à bacia, sua construção é composta por uma parte correspondente à construção de um prisma, de dimensões 120x60x2,5 m, e por outra com forma de tronco de pirâmide, com dimensões de 60 m de largura por 120 m de comprimento na base menor, e 73 m de largura por 140 m de comprimento na base maior, com altura de 3,75 m de altura. A Figura 6 mostra um esquema de construção da bacia de contenção.

Figura 6 - Estrutura esquemática da construção da bacia de contenção.



Fonte: Projeto Interno, Hydro.

Dito isso, essas medidas resultam em uma área de piso total de 7.200 m^2 e um volume total de 50.500 m^3 . A área de contribuição da bacia, entretanto, precisa levar em consideração a área total disponível para captar a água de chuva, ou seja, é necessário considerar as dimensões de área maior do dique. Dessa forma, a área de contribuição, ao considerar a área de base maior, possui um valor de 10220 m^2 .

A vazão da bomba, por sua vez, foi estimada levando em consideração a área de contribuição do sistema, a altura máxima de coluna de fluido permitida dentro da área da bacia de contenção, considerando os 300 mm da Regra da Bota, e o volume acumulado, uma vez que ele relaciona o fluxo de afluentes e o fluxo bombeado.

Uma vez conhecendo o volume acumulado através da Equação 5, que relaciona a vazão da bomba, e sabendo que o volume de fluido no sistema não pode ultrapassar a altura de 0,3 m, encontra-se um valor de vazão para a bomba através do chute que respeite a restrição de altura máxima.

Assim, conhecendo a área de contribuição de 10220 m^2 e sabendo que a lâmina d'água não pode ultrapassar o valor de 0,3 m, estima-se um valor de vazão correspondente a cada um dos tempos de retorno da chuva.

O procedimento detalhado acima foi realizado para as chuvas de tempo de retorno de 25, 1000 e 10000 anos, a fim de se obter a simulação hidrológica respectiva de cada uma.

4.2 DIMENSIONAMENTO DOS POÇOS LOCALIZADOS NA ÁREA DO DIQUE E NO SETOR DA CASA DE BOMBAS

4.2.1 Dimensionamento do poço interno ao dique

Para a determinação das dimensões do poço interno ao dique, foi necessário, conforme exposto anteriormente, a realização do cálculo hidrológico preliminar. Nesse sentido, a utilização da Equação 1, sobre intensidade pluviométrica aplicada à cidade de Barcarena, se fez extremamente necessária; isso porque os valores adquiridos através dela mostram os parâmetros limites que devem ser respeitados para que não haja vazamentos em caso de colapso do tanque de soda cáustica. Posto isso, o volume do poço a ser calculado deve ser suficiente para comportar o fluxo de fluidos que poderão adentrar a área, como o volume de chuva e o de soda.

Desconsiderando o colapso do tanque de início, a vazão de chuva que permanecerá dentro do poço, então, se baseia na equação de balanço de massa, considerando apenas a entrada de água da chuva sobre o dique e a saída correspondente, conforme equação 6.

$$V_{chuva} = V_{af} - V_b \quad (6)$$

Onde:

- V_{chuva} : volume de chuva dentro da bacia (m^3);
- V_{af} : volume de afluente (m^3);
- V_b : volume bombeado (m^3).

Outra forma de perceber essa relação é considerando que o volume de chuva na bacia, para determinado tempo, se dá pela diferença do volume de entrada e volume de saída, conforme Equações 3 e 4.

O volume útil para situações extremas, por sua vez, se dá considerando o volume total do dique disponível para captar água da chuva e o volume de soda dentro do tanque: em caso de colapso, o volume útil deve ser necessário para manter a água da chuva e o volume de soda cáustica. O volume de soda leva em consideração a base do tanque, de 48 m de diâmetro, e a coluna de fluidos de 11 m. O volume máximo para acúmulo de chuva em m^3 deve, então, ser a diferença entre o volume do dique e o volume de soda cáustica contida dentro do tanque.

O valor do volume de soda é calculado sabendo a dimensão de base do tanque, de 1800 m^2 , e o volume de coluna de fluido, de 11 m.

Dito isso, o poço da área do dique deve ter sua construção levando em consideração que a bacia de contenção não pode ultrapassar um volume de fluido de 30700 m^3 .

A lógica segue: será bombeado para dentro do poço uma quantidade de água suficiente para que o volume que restar dentro da bacia não ultrapasse uma altura de 300 mm. Dessa forma, as dimensões do poço devem se basear na vazão da bomba.

Levando em consideração que o maior tempo de chuva analisado neste problema — o com tempo de retorno de 10000 anos — pode acontecer em durações de mais de 1 dia e que fornece um volume de água muito alto, é provável que o volume de chuva acumulado será alto demais para se trabalhar com uma só partida de bomba. Tendo isso em mente, no poço haverá uma bomba que trabalhará dando 4 partidas a cada hora. Então, o volume calculado para o poço levará em consideração que o volume total acumulado de afluente dentro dele será referente à vazão da bomba dividida em quatro partes.

Por fim, uma vez que o poço terá forma de um tronco de uma pirâmide, a Equação 7 mostra, finalmente, o procedimento para o cálculo do dimensionamento do poço da área do dique.

$$V = \frac{h}{3} \cdot (A_1 + A_2 + \sqrt{(A_1 \cdot A_2)}) \quad (7)$$

Onde:

- V: volume do tronco (m³);
- h: altura do tronco (m);
- A1: área da base menor (m²);
- A2: área da base maior (m²).

É válido pontuar que o método detalhado acima foi realizado também para cada uma das chuvas com tempos de retorno, levando em consideração a simulação hidrológica respectiva de cada uma.

4.2.2 Dimensionamento do poço da casa de bombas

O poço para a casa de bombas, por sua vez, segue um procedimento análogo, porém com abordagem diferente.

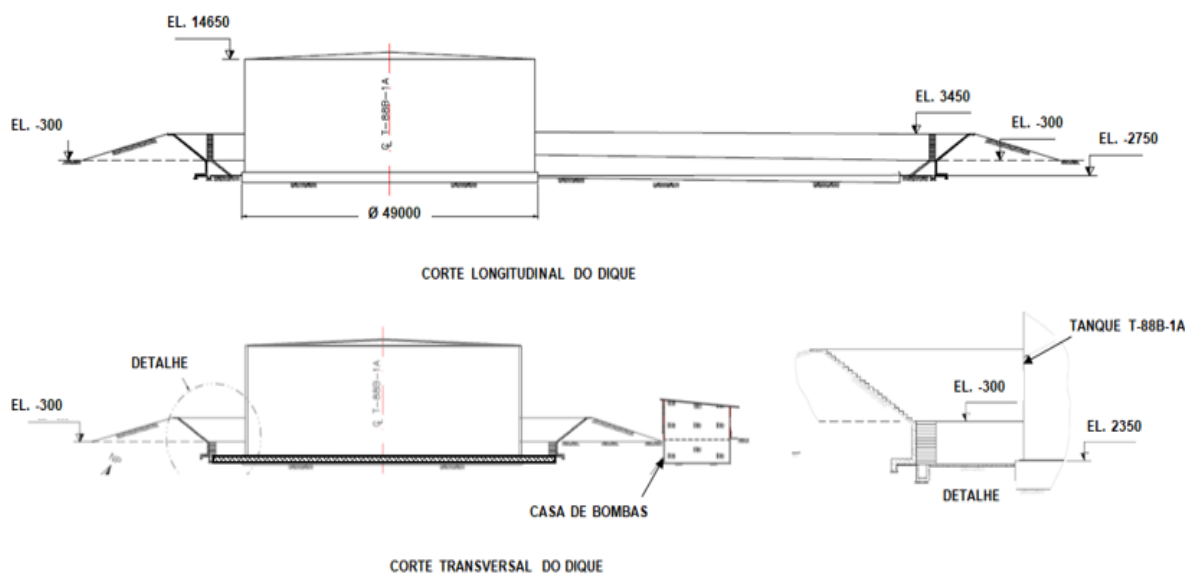
Nisso, próximo ao dique de contenção do tanque encontra-se a casa de bombas; entretanto, diferente do poço interno ao dique, ela localiza-se fora da área de contenção. Com isso, considerando a possibilidade de entrada de chuva, será necessário a execução da drenagem dentro da própria casa de bombas. Essa medida se torna essencial devido à posição da casa em uma elevação abaixo do dique de contenção, o que impossibilita uma drenagem por gravidade. A Figura 7 exibe a locação da casa de bombas em relação ao dique.

Diante desse cenário, será realizado um cálculo minucioso para determinar as

dimensões que o poço deve adotar para comportar possíveis vazamentos, assim assegurando sua integração ao sistema de drenagem.

Para isso, a vazão de efluentes que será manejada dentro do poço será obtida por meio da simulação hidrológica realizada de cada um dos tempos de retorno, e o processo também será baseado na equação de balanço de massa, considerando a entrada de água da chuva e a vazão de drenagem.

Figura 7 - Disposição da casa de bombas em relação à área de contenção.



Fonte: Projeto Interno, Hydro.

A vazão de chuva, então, é calculada através da Equação 2.

$$Q = \frac{C \times I \times A}{1000} \quad (2)$$

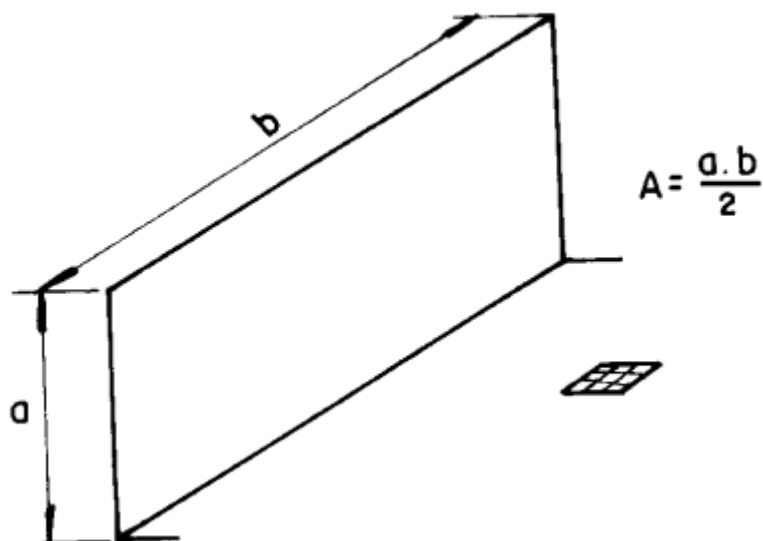
Onde:

- Q: vazão de chuva (m³/h);
- C: coeficiente de escoamento superficial (adimensional);
- I: intensidade da chuva (mm/h);
- A: área de contribuição (m²).

O coeficiente de escoamento adotado nessa etapa é 1 devido à área de contribuição que, dessa vez, leva em consideração a região com superfície molhada, ou seja, a região que é suscetível à água da chuva. Essa região traduz a parte lateral descoberta da casa de bombas, uma vez que ela possui apenas 3 lados e um telhado. Desse modo, a região com superfície molhada tem um comprimento total de 12 m e uma largura de 9 m. Conforme a norma NBR 10844, o cálculo para a área de contribuição é ilustrado na Figura 8.

A área de contribuição, em m², é equivalente a 54 m².

Figura 8 - Ilustração da área de contribuição conforme ABNT NBR 10844/1989.



Fonte: Adaptado de Associação Brasileira de Normas (1989).

A vazão de drenagem, por sua vez, será determinada com base na premissa de que ela corresponderá a 10% da vazão atual da bomba presente na casa, que é de 250 m³/h. Essa abordagem foi adotada como uma medida de contingência, garantindo uma taxa de retorno em caso de eventualidades. Essa vazão também corresponde à quantidade de fluido proveniente das canaletas e que é alocada no poço da casa de bombas.

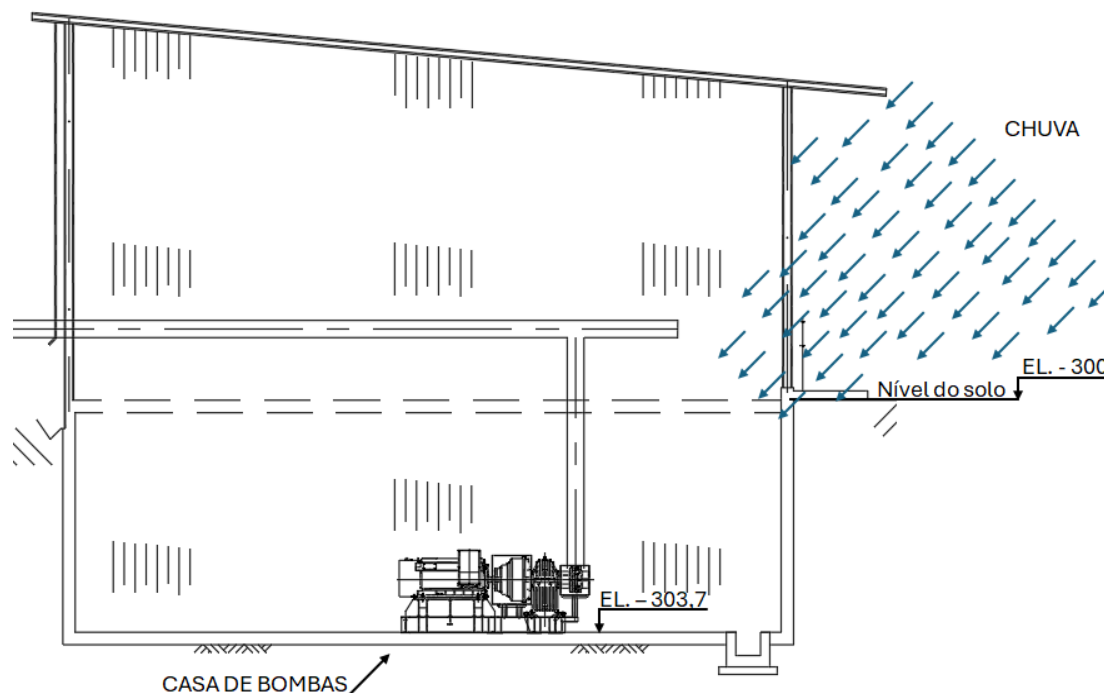
Além disso, é válido mencionar que inicialmente o poço está vazio. Assim, a vazão de efluentes que será manejada dentro do poço da casa de bombas é constituída a partir da vazão de drenagem mais a contribuição de chuva, resultando na Equação 8.

$$Q_e = Q_{\text{drenagem}} + Q_{\text{chuva}} \quad (8)$$

A figura 9 ilustra a forma como a água da chuva acresce nesse sistema.

Dessa forma, a vazão de efluentes dentro do poço correspondente à intensidade de cada tempo de chuva foi encontrada e, a partir disso, seguindo o procedimento detalhado pela Equação 7, foi possível obter as dimensões do poço referente à casa de bomba.

Figura 9 - Região da casa de bombas que sofre influência pluviométrica.



Fonte: Projeto Interno, Hydro.

4.3 ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DE CANALETAS PARA O SISTEMA DE DRENAGEM

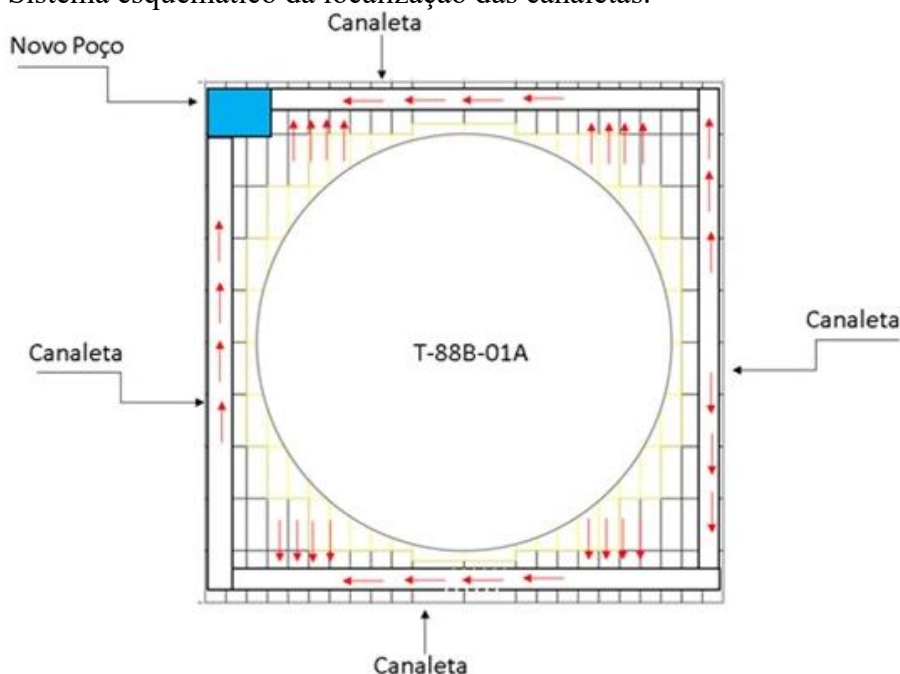
4.3.1 Análise e dimensionamento de canaletas para o sistema de drenagem interno à bacia de contenção.

No que tange o sistema de drenagem, atualmente há canaletas perimetrais na área do dique de contenção que têm a função de direcionar a água pluvial para um sistema de separação de fases que envolve uma caixa separadora de água e óleo. Entretanto, é necessário avaliar se essas canaletas são adequadas para as demandas do novo dique. A princípio, a interligação entre as canaletas e o sistema de separação será interrompido, e a nova função delas será direcionar a água pluvial para o novo poço do dique. Dito isso, como será implementado um novo poço para o dique de contenção, será dimensionado canaletas com o fluxo direcionado ao poço, garantindo um escoamento eficiente e adequado às necessidades do sistema.

Posto isso, as canaletas atuais têm dimensões de 40 cm de largura x 37,4 cm de profundidade, conforme desenho fornecido pela empresa acerca d'Adaptação do tanque de Armazenamento. Dessa forma, considerando que as canaletas do dique também possuem uma

declividade de 0,0067 m/m, será adotado as mesmas dimensões das canaletas já existentes para caso de estudo. A Figura 10 mostra um esquema da localização das canaletas do sistema de drenagem do dique.

Figura 10 - Sistema esquemático da localização das canaletas.



Fonte: Projeto Interno, Hydro.

Levando em consideração as dimensões das canaletas atuais e o volume de afluente respectivo a cada um dos tempos de retorno de chuva — 25, 1000 e 10000 anos — que possivelmente chegará às canaletas, será verificado a altura da lâmina d'água; isso com o intuito de assegurar que o escoamento dentro das canaletas seja realizado ao destino devido sem a ocorrência de transbordo.

Para tal, o Software Canalssoft, ferramenta utilizada em análises de condutos livres, foi necessário. O programa, com base no coeficiente de Manning, na declividade e na vazão do projeto, fornece as dimensões necessárias para que as canaletas manejem o volume de fluido sem que haja transbordo. A ferramenta, em seu funcionamento, recebe os dados de entrada (vazão, declividade, rugosidade) e aplica as equações hidráulicas, como Manning e continuidade, codificadas em linguagem de programação. O cálculo, então, é feito de forma iterativa, ajustando variáveis até que os resultados atendam aos critérios definidos. Por fim, o software valida e apresenta as dimensões finais da canaleta de acordo com os parâmetros fornecidos. A Figura 11 mostra a interface do Software e os parâmetros requeridos para o cálculo das dimensões.

Figura 11 - Interface do Software Canalssoft.

Canal Retangular Econômico

Arquivo

Dados

Rugosidade composta ? ☐ Sim ☐ Não

Talude esquerdo

Talude Direito

Fundo

Coeficiente de Manning Selecionar ...

Declividade m/m

Profundidade (y) m

Largura da base (b) m

Vazão m³/s

Resultados

Rug. Equivalente

Área de Fluxo m²

Perímetro Molhado m

Raio Hidráulico m

Velocidade média m/s

Velocidade crítica m/s

Profundidade média m

Profundidade crítica m

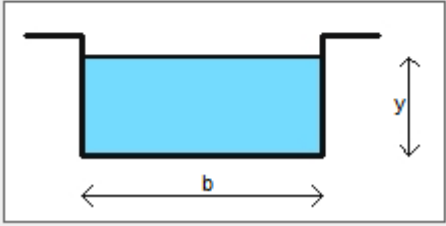
Declividade crítica m/m

Energia cinética m

Energia Específica m

Número de Froude

Calcular Apagar Relatório



Voltar

Fonte: Próprio autor (2025).

Na interface, é requerido:

1. O coeficiente de Manning, que representa a resistência ao fluxo do fluido devido à rugosidade da superfície do canal ou leito; ele é fornecido pelo próprio Canalssoft ao indicar o tipo de material do qual é feito as canaletas. Para este projeto, o material que constitui é concreto;
2. A declividade do sistema, em m/m;
3. A vazão referente aos tempos de chuva, levando em consideração um período de 24 horas.

Dessa forma, ao comparar os valores das dimensões fornecidas com as já existentes, é possível verificar se as dimensões atuais são suficientes para o manejo do volume de afluentes. Caso não sejam adequadas, as novas dimensões fornecidas pelo Canalssoft serão adotadas, inserindo uma altura adicional de 20 cm na dimensão correspondente à profundidade para margens de segurança.

4.3.2 Análise e dimensionamento de canaletas para o sistema de drenagem da casa de bombas.

Análogo ao sistema de drenagem interno à bacia de contenção, para o sistema da casa de bombas será instalado novas canaletas perimetrais com a finalidade de direcionar o fluido até o poço correspondente. Entretanto, a declividade para esse sistema é 0,005 m/m e essas novas canaletas serão dimensionadas levando em consideração a vazão que adentra a casa de bombas, respectiva a cada tempo de chuva, conforme a Equação 8, garantindo que o efluente seja corretamente direcionado para o poço sem risco de transbordamentos.

O procedimento para isso segue exatamente a metodologia para as canaletas da bacia de contenção, em que se segue:

1. A análise das atuais dimensões das canaletas;
2. A comparação entre as dimensões existentes e as dimensões calculadas pelo Canalssoft, levando em consideração a vazão que adentra a casa de bombas;
3. A adoção das novas dimensões para o caso de as existentes não serem adequadas frente à nova vazão.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA

5.1.1 Simulação hidrológica para chuva com tempo de retorno de 25 anos.

A simulação hidrológica realizada para chuva com tempo de retorno de 25 anos apresentou resultados, como esperado, que mostram um volume de água de chuva considerável, mas que mesmo assim continua menor que o volume de afluentes de chuvas com tempo de retorno maiores; e isso se explica pelo seu índice pluviométrico que leva em consideração o seu tempo de retorno de 25 anos. A tabela 2 mostra os resultados obtidos a partir dessa simulação.

O valor obtido para a vazão da bomba, respeitando o limite de 300 mm de altura, foi de 1348 m³/h. Assim, conforme mostra a tabela, a altura máxima atingida em 24 horas ao se trabalhar com uma bomba com essa determinada vazão é de 0,298 m.

Posto isso, durante o período de 24 horas de chuva, simulado pelo método de Otto Pfafstetter, o volume total acumulado, de 3050,6 m³, não ultrapassou os 30700 m³ reservados para o volume útil do dique. Assim, essa vazão de saída garante uma margem de segurança adequada para o sistema de drenagem mantendo o dique dentro dos limites operacionais esperados.

5.1.2 Simulação hidrológica para chuva com tempo de retorno de 1000 anos.

A simulação hidrológica realizada para a chuva com tempo de retorno de 1000 anos, por sua vez, também apresentou um comportamento conforme o esperado, isso porque sua simulação expôs um volume de água de chuva ainda maior para um mesmo período de 24 horas, quando se comparado ao tempo de retorno de 25 anos. E isso também se explica pelo seu índice pluviométrico que leva em consideração o seu tempo de retorno de 1000 anos, que traz um volume de chuva ainda maior. A tabela 3 mostra os resultados obtidos a partir dessa simulação.

Dessa vez, o valor obtido para a vazão da bomba, também levando em consideração o limite de 300 mm de altura, foi de 2615 m³/h. Assim, conforme mostra a tabela, a altura máxima atingida em 24 horas ao se trabalhar com uma bomba com essa determinada vazão é de 0,290 m.

Tabela 2 - Simulação hidrológica para a chuva com tempo de retorno de 25 anos.

t (min)	5	15	30	60	120	240	480	840	1440
a	0,108	0,122	0,138	0,156	0,166	0,174	0,176	0,174	0,17
b	-0,04	0	0	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
I (mm/h)	17,7	35,9	50,6	72,4	91,8	112,7	133,7	151,2	169,8
Q (m3/h)	153,7	311,6	440,0	629,3	797,6	978,9	1161,2	1313,2	1475,1
Volume de entrada (m ³)	12,8	77,9	220,0	629,3	1595,1	3915,8	9289,4	18384,7	35402,6
Volume de saída (m ³)	112,3	337,0	674,0	1348,0	2696,0	5392,0	10784,0	18872,0	32352,0
Volume acumulado (m ³)	-99,5	-259,0	-454,0	-718,7	-1100,8	-1476,2	-1494,5	-487,2	3050,6
Altura da lâmina d'água (m)	-0,010	-0,025	-0,044	-0,070	-0,108	-0,144	-0,146	-0,048	0,298

Fonte: Próprio autor (2025).

Tabela 3 - Simulação hidrológica para a chuva com tempo de retorno de 1000 anos.

t (min)	5	15	30	60	120	240	480	840	1440
a	0,108	0,122	0,138	0,156	0,166	0,174	0,176	0,174	0,17
b	-0,04	0	0	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
I (mm/h)	26,6	56,3	84,3	127,7	167,9	212,3	253,7	284,8	315,2
Q (m ³ /h)	230,9	488,8	732,0	1109,4	1459,0	1844,4	2203,9	2474,1	2738,5
Volume de entrada (m ³)	19,2	122,2	366,0	1109,4	2917,9	7377,5	17631,2	34637,6	65723,1
Volume de saída (m ³)	217,9	653,7	1307,5	2615,0	5230,0	10460,0	20920,0	36610,0	62760,0
Volume acumulado (m ³)	-198,6	-531,5	-941,4	-1505,5	-2312,0	-3082,5	-3288,7	-1972,4	2963,0
Altura da lâmina d'água (m)	-0,019	-0,052	-0,092	-0,147	-0,226	-0,302	-0,322	-0,193	0,290

Fonte: Próprio autor (2025).

Posto isso, durante o período de 24 horas de chuva, simulado pela equação de Otto Pfafstetter, o volume total ocupado, de $2963,084 \text{ m}^3$, não ultrapassou os 30700 m^3 reservados para o volume útil do dique. Diante disso, infere-se que essa vazão de saída da bomba é adequada para o sistema de drenagem mantendo o dique dentro dos limites operacionais esperados, já que mantém o sistema dentro dos limites de operação estipulados.

5.1.3 Simulação hidrológica para chuva com tempo de retorno de 10000 anos.

No que diz respeito à chuva com tempo de retorno decamilenar, sua simulação trouxe volumes de entrada maiores que quaisquer outros, haja vista sua duração e índice pluviométrico elevados. A tabela 4 expõe os valores obtidos.

Através dos valores expostos, entende-se que, ao passo em que, no período de 24 horas, é adicionado ao sistema um volume de chuva de $96023,7 \text{ m}^3$ e é retirado pela bomba um volume de 93000 m^3 , o volume ocupado chega a no máximo $3023,73 \text{ m}^3$, o que é bem menor quando comparado ao volume útil reservado do dique. No que tange os limites de altura, uma vazão da bomba de $3875 \text{ m}^3/\text{h}$ é o suficiente para garantir que os parâmetros fiquem dentro dos limites, uma vez que a altura máxima de coluna de fluido atingida para essa simulação foi $0,296 \text{ m}$.

Dito isso, é possível afirmar que, diante as dimensões atuais do dique, a chuva de maior tempo de retorno ainda não é suficiente para colocar o sistema em risco.

5.2 DIMENSIONAMENTO DOS POÇOS INTERNO AO DIQUE E DA CASA DE BOMBAS

5.2.1 Dimensionamento do poço da área do dique.

No que tange o dimensionamento dos poços, conforme dito na metodologia, o procedimento foi realizado levando em consideração a vazão estipulada da bomba para cada um dos tempos de retorno de chuva, visto que essa vazão é suficiente para prevenir transbordo.

Assim, a vazão de $1385 \text{ m}^3/\text{h}$ para a chuva de 25 anos será usada como referência para o cálculo das dimensões do poço desse cenário. De forma a garantir que durante operações normais a bomba tenha um ciclo de liga-desliga de pelo menos 15 minutos, será definida a dimensão mínima do poço variando o tempo de 15 min até 1h. A tabela 5 mostra os valores de volume que adentrarão o poço nos tempos 15, 30, 45 e 60 minutos.

Tabela 4 - Simulação hidrológica para a chuva com tempo de retorno de 10000 anos.

t (min)	5	15	30	60	120	240	480	840	1440
a	0,108	0,122	0,138	0,156	0,166	0,174	0,176	0,174	0,17
b	-0,04	0	0	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
I (mm/h)	34,5	74,5	115,8	180,7	243,1	313,1	375,8	420,0	460,6
Q (m ³ /h)	299,7	647,3	1005,8	1569,5	2112,0	2719,6	3264,8	3648,2	4001,0
Volume de entrada (m ³)	25,0	161,8	502,9	1569,5	4224,1	10878,5	26118,2	51075,0	96023,7
Volume de saída (m ³)	322,9	968,7	1937,5	3875,0	7750,0	15500,0	31000,0	54250,0	93000,0
Volume acumulado (m ³)	-297,9	-806,9	-1434,5	-2305,5	-3525,9	-4621,4	-4881,8	-3175,0	3023,7
Altura da lâmina d'água (m)	-0,029	-0,079	-0,140	-0,226	-0,345	-0,452	-0,478	-0,311	0,296

Fonte: Próprio autor (2025).

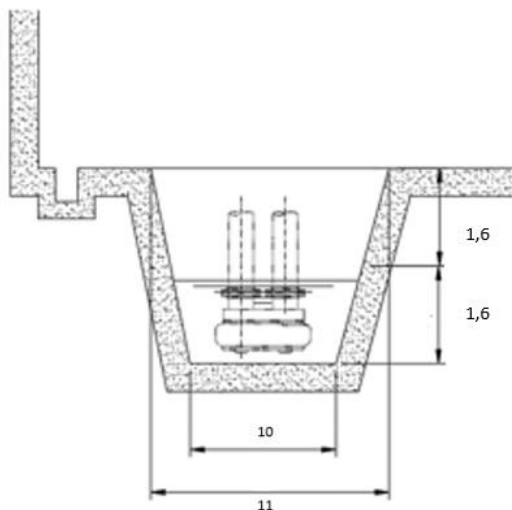
Tabela 5 - Volume de água no poço de cenário de 25 anos.

Tempo (min)	Volume (m ³)
15	346,2
30	692,5
45	1038,7
60	1385

Fonte: Próprio autor (2025).

Uma vez sabido que ocorrerão 4 partidas por hora, a dimensão do poço deve ser feita levando em consideração que ele deve comportar um volume de 346,2 m³ de água por vez. Considerando uma base maior quadrada de lado 11 m e uma base menor também quadrada de 10 m de lado, e altura de 3,2 m, o poço assume um valor de 353 m³, o que é suficiente para comportar o volume bombeado para dentro do poço. A figura 12 mostra o esquema para esse poço.

Figura 12 - Dimensões adotadas para o poço de cenário de chuva de 25 anos.



Fonte: Projeto Interno, Hydro.

Para o cenário de 1000 anos, o mesmo procedimento foi realizado, entretanto as dimensões adotadas para o poço foram consideravelmente maiores devido ao volume de fluido mais elevado. Para esse contexto, a vazão da bomba é de 2615 m³/h. Sendo assim, essa vazão, dividida nas 4 partidas da bomba, fica conforme a tabela 6.

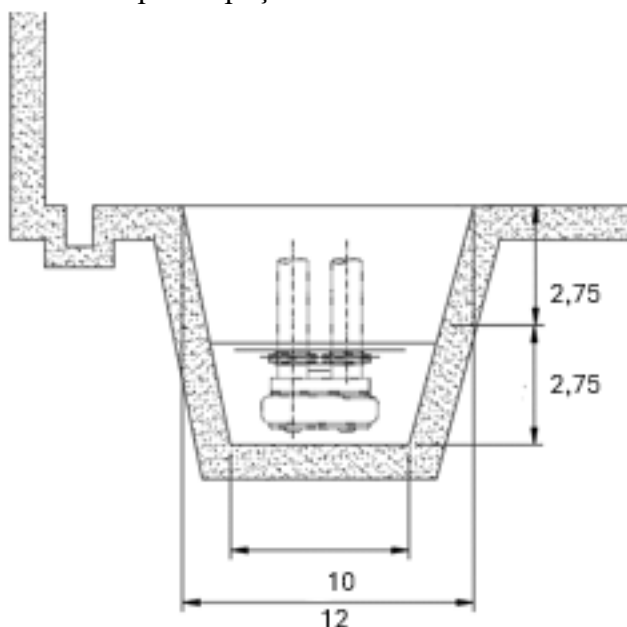
Tabela 6 - Volume de água no poço de cenário de 1000 anos.

Tempo (min)	Volume (m ³)
15	653,7
30	1307,5
45	1961,2
60	2615

Fonte: Próprio autor (2025).

Dessa forma, a dimensão do poço deve ser feita levando em consideração que ele deve comportar um volume de 653,7 m³ de água por vez. Tendo em vista uma construção de base maior quadrada de lado 12 m e de base menor também quadrada de 10 m de lado, e altura de 5,5 m, o poço assume um valor de 667,3 m³, o que é suficiente para comportar o volume bombeado para dentro do poço. A figura 13 traz o esquema para esse poço.

Figura 13 - Dimensões adotadas para o poço de cenário de chuva de 1000 anos.



Fonte: Projeto Interno, Hydro.

Por último, o cenário de 10000 anos é, claramente, o que possui o poço com as maiores dimensões. Para este caso, a variação do volume de 3875 m³ para os tempos de 15, 30, 45 e 60 minutos pode ser visto na tabela 7.

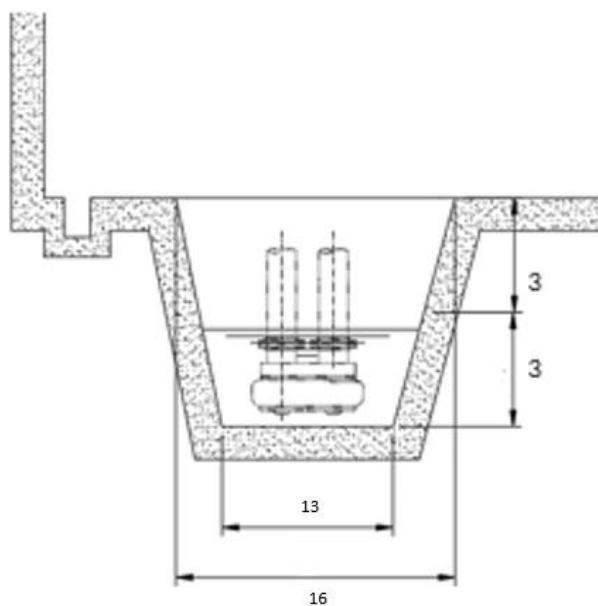
Tabela 7 - Volume de água no poço de cenário de 10000 anos.

Tempo (min)	Volume (m ³)
15	968,7
30	1937,5
45	2906,2
60	3875

Fonte: Próprio autor (2025).

Conforme o exposto, a dimensão do poço deve garantir que ele comporte um volume de 968,7 m³. Assim, um poço de base maior quadrada de lado 16 m e de base menor também quadrada de 13 m de lado, e altura de 6 m, assume um valor de 1094 m³, o que é suficiente para comportar o volume bombeado para dentro do poço. Essas dimensões são exibidas na Figura 14.

Figura 14 - Dimensões adotadas para o poço de cenário de chuva de 10000 anos.



Fonte: Próprio autor (2025).

Diante o exposto, é correto afirmar que um poço de 1094 m³ é o ideal para garantir o funcionamento seguro do sistema, já que ele é o suficiente para manejar afluentes provenientes do cenário mais crítico possível, que é a chuva de 10000 anos, que por sua vez possui ocorrências bem baixas.

5.2.2 Dimensionamento do poço da casa de bombas.

Para o dimensionamento do poço da casa de bombas, as dimensões encontradas foram feitas levando em consideração a contribuição de vazão de drenagem e de água da chuva, que por sua vez relacionou a intensidade e a área de perímetro molhado do sistema.

Para o cenário de 25 anos, a vazão de entrada para o poço obtida foi de 34,2 m³/h, enquanto para os cenários de 1000 e 10000 anos os valores foram de 42 m³/h e 50 m³/h, respectivamente.

Dito isso, para o cenário de 25 anos, uma bomba com vazão de 35 m³/h é suficiente para prevenir quaisquer vazamentos. Repetindo o procedimento detalhado de respeitar o ciclo de liga e desliga da bomba e tendo suas 4 partidas em um tempo de 24 horas, a vazão é conforme a tabela 8.

Tabela 8 - Volume de água no poço de cenário de 25 anos.

Tempo (min)	Volume (m ³)
15	8,75
30	17,5
45	26,25
60	35

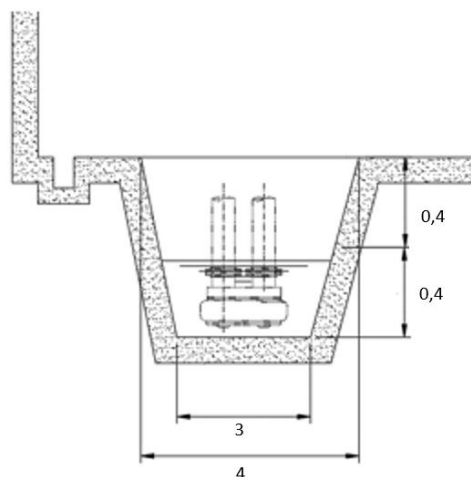
Fonte: Próprio autor (2025).

Consoante a isso, as dimensões do poço devem ser suficientes para comportar um volume de 8,75 m³. Assim, as dimensões do poço devem seguir:

- Altura: 0,8 m;
- Área da base maior (4 x 4): 16 m²;
- Área da base menor (3 x 3): 9 m².

Essas dimensões resultam em um volume de 9,86 m³, o que é suficiente para evitar transbordo. A configuração do poço é mostrada na Figura 15.

Figura 15 - Dimensões adotadas para o poço da casa de bombas de cenário de chuva de 25 anos.



Fonte: Próprio autor (2025).

Para as chuvas de cenário de 1000 e 10000 anos, a divisão da vazão segue, respectivamente, as tabelas 9 e 10.

Tabela 9 - Volume de água no poço de cenário de 1000 anos.

Tempo (min)	Volume (m ³)
15	10,75
30	21,5
45	32,25
60	43

Fonte: Próprio autor (2025).

Tabela 10 - Volume de água no poço de cenário de 10000 anos.

Tempo (min)	Volume (m ³)
15	12,75
30	25,5
45	38,25
60	51

Fonte: Próprio autor (2025).

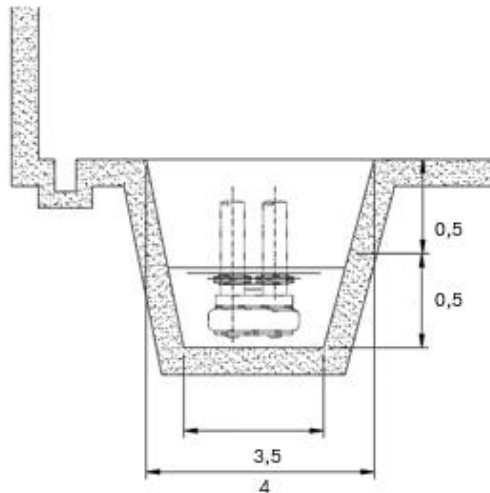
Para o cenário de 1000 anos, as dimensões devem ser suficientes para um volume de 10,75 m³. Assim, elas devem ser:

- Altura: 1 m;

- Área da base maior (4 x 4): 16 m²;
- Área da base menor (3,5 x 3,5): 12,25 m².

Essas dimensões resultam em um volume de 14,1 m³, o que é suficiente para evitar transbordo. A configuração do poço é exibida na Figura 16.

Figura 16 - Dimensões adotadas para o poço da casa de bombas de cenário de chuva de 1000 anos.



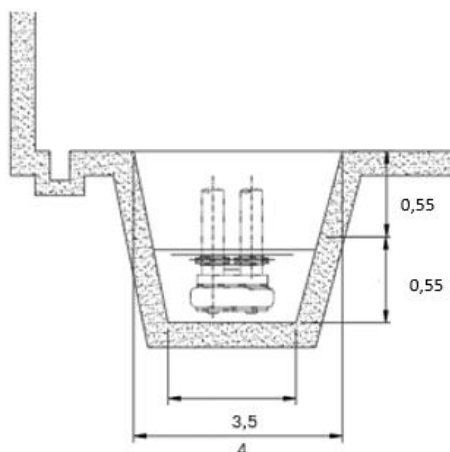
Fonte: Próprio autor (2025).

Para o cenário de 10000 anos, finalmente, as dimensões devem ser suficientes para um volume de 12,75 m³. Assim, elas devem ser:

- Altura: 1,1 m;
- Área da base maior (4 x 4): 16 m²;
- Área da base menor (3,5 x 3,5): 12,25 m².

Essas dimensões resultam em um volume de 15,5 m³, o que é suficiente para evitar transbordo. A configuração do poço é vista na Figura 16.

Figura 17 - Dimensões adotadas para o poço da casa de bombas de cenário de chuva de 10000 anos.



Fonte: Próprio autor (2025).

Conforme a análise, é possível afirmar que um poço de $12,75 \text{ m}^3$ para a casa de bombas é o ideal para garantir o funcionamento seguro do sistema, já que ele é o suficiente para manejar afluentes provenientes do cenário mais crítico possível, que é a chuva de 10000 anos.

5.3 ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DAS NOVAS CANALETAS DA ÁREA DO DIQUE E DA CASA DE BOMBAS

5.3.1 Análise e dimensionamento de canaletas para o sistema de drenagem interno à bacia de contenção.

No que tange o dimensionamento das canaletas da área de contenção, a vazão levada em consideração se deu pelo valor obtido pelas simulações hidrológicas respectivas ao tempo de retorno de cada uma das chuvas; esse valor diz respeito à vazão pontuada nos tempos de 1440 min das Tabelas 2, 3 e 4. Assim, as vazões usadas serão $1475,1 \text{ m}^3/\text{h}$, $2738,5 \text{ m}^3/\text{h}$ e $4001 \text{ m}^3/\text{h}$.

As dimensões obtidas para as canaletas de cenário 25, 1000 e 10000 anos são exibidas, respectivamente, nas Figuras 18, 19 e 20.

Figura 18 - Dimensões das canaletas do poço para o cenário de 25 anos.

Canal Retangular Econômico

Arquivo

Dados

Rugosidade composta ? ☐ Sim ☒ Não

Talude esquerdo

Talude Direito

Fundo

Coefficiente de Manning Selecionar ...

Declividade m/m

Profundidade (y) m

Largura da base (b) m

Vazão m³/s

Resultados

Rug. Equivalente 0,014

Área de Fluxo 0,23 m²

Perímetro Molhado 1,36 m

Raio Hidráulico 0,17 m

Velocidade média 1,78 m/s

Velocidade crítica 1,81 m/s

Profundidade média 0,34 m

Profundidade crítica 0,33 m

Declividade crítica 0,0069 m/m

Energia cinética 0,16 m

Energia Específica 0,50 m

Número de Froude 0,98

Escoamento Subcrítico

Diagrama:

Botões: Calcular, Apagar, Relatório, Voltar

Fonte: Próprio autor (2025).

Figura 19 - Dimensões das canaletas do poço para o cenário de 1000 anos.

Canal Retangular Econômico

Arquivo

Dados

Rugosidade composta ? ☐ Sim ☒ Não

Talude esquerdo

Talude Direito

Fundo

Coefficiente de Manning Selecionar ...

Declividade m/m

Profundidade (y) m

Largura da base (b) m

Vazão m³/s

Resultados

Rug. Equivalente 0,014

Área de Fluxo 0,36 m²

Perímetro Molhado 1,71 m

Raio Hidráulico 0,21 m

Velocidade média 2,09 m/s

Velocidade crítica 2,06 m/s

Profundidade média 0,43 m

Profundidade crítica 0,43 m

Declividade crítica 0,0065 m/m

Energia cinética 0,22 m

Energia Específica 0,65 m

Número de Froude 1,02

Escoamento Supercrítico

Diagrama:

Botões: Calcular, Apagar, Relatório, Voltar

Fonte: Próprio autor (2025).

Figura 20 - Dimensões das canaletas do poço para o cenário de 10000 anos.

Canal Retangular Econômico

Arquivo

Dados

Rugosidade composta ? ☐ Sim ☒ Não

Talude esquerdo

Talude Direito

Fundo

Coeficiente de Manning Selecionar ...

Declividade m/m

Profundidade (y) m

Largura da base (b) m

Vazão m³/s

Resultados

Rug. Equivalente	0,014
Área de Fluxo	0,48 m²
Perímetro Molhado	1,97 m
Raio Hidráulico	0,25 m
Velocidade média	2,29 m/s
Velocidade crítica	2,23 m/s
Profundidade média	0,49 m
Profundidade crítica	0,51 m
Declividade crítica	0,0062 m/m
Energia cinética	0,27 m
Energia Específica	0,76 m
Número de Froude	1,04

Escoamento Supercrítico

Calcular Apagar Relatório

Diagrama: Largura da base (b) = 0,98 m, Profundidade (y) = 0,49 m

Voltar

Fonte: Próprio autor (2025).

Conforme tido de antemão, as atuais canaletas possuem dimensões de 40 cm de largura e 37,4 cm de profundidade. Frente ao cenário de 10000 anos, as canaletas para manejar a quantidade de água devem ter dimensões de 98 cm de largura e 49 cm de altura. Sendo assim, infere-se que as atuais canaletas não são apropriadas para o bom funcionamento do sistema, uma vez que ocorreria transbordo caso houvesse ocorrência do cenário mais crítico. Dessa forma, adicionando os 20 cm de altura a mais para evitar que o fluido escoe muito próximo à borda da canaleta, as dimensões para elas devem ser de 98 cm de largura e 69 cm de altura.

5.3.2 Análise e dimensionamento de canaletas para o sistema de drenagem da casa de bombas.

Consoante com o procedimento para a área de contenção, o dimensionamento das canaletas para a casa de bombas também levou em consideração a vazão de chuva correspondente às chuvas de 25, 1000 e 10000 anos; porém, dessa vez, a vazão considerada é aquela que chega à casa de bombas mais a contribuição da vazão de drenagem. Assim, as vazões para cada tempo de chuva são 34,2 m³, 42 m³ e 50 m³. Ao considerar a declividade de 0,005 m/m e a coeficiente de Manning para concreto de 0,014, as dimensões obtidas para as canaletas de cenário 25, 1000 e 10000 anos são expostas, respectivamente, nas Figuras 21, 22 e 23.

Figura 21- Dimensões das canaletas do poço para o cenário de 25 anos.

Canal Retangular Econômico

Arquivo

Dados

Rugosidade composta ? ☐ Sim ☒ Não

Talude esquerdo

Talude Direito

Fundo

Coefficiente de Manning Selecionar ...

Declividade m/m

Profundidade (y) m

Largura da base (b) m

Vazão m³/s

Resultados

Rug. Equivalente	0,014
Área de Fluxo	0,02 m²
Perímetro Molhado	0,35 m
Raio Hidráulico	0,04 m
Velocidade média	0,61 m/s
Velocidade crítica	0,81 m/s
Profundidade média	0,09 m
Profundidade crítica	0,07 m
Declividade crítica	0,0101 m/m
Energia cinética	0,02 m
Energia Específica	0,11 m
Número de Froude	0,66

Escoamento Subcrítico

Calcular Apagar Relatório

Voltar

Fonte: Próprio autor (2025).

Figura 22 - Dimensões das canaletas do poço para o cenário de 1000 anos.

Canal Retangular Econômico

Arquivo

Dados

Rugosidade composta ? ☐ Sim ☒ Não

Talude esquerdo

Talude Direito

Fundo

Coefficiente de Manning Selecionar ...

Declividade m/m

Profundidade (y) m

Largura da base (b) m

Vazão m³/s

Resultados

Rug. Equivalente	0,014
Área de Fluxo	0,02 m²
Perímetro Molhado	0,38 m
Raio Hidráulico	0,05 m
Velocidade média	0,65 m/s
Velocidade crítica	0,84 m/s
Profundidade média	0,10 m
Profundidade crítica	0,07 m
Declividade crítica	0,0098 m/m
Energia cinética	0,02 m
Energia Específica	0,12 m
Número de Froude	0,67

Escoamento Subcrítico

Calcular Apagar Relatório

Voltar

Fonte: Próprio autor (2025).

Figura 23 - Dimensões das canaletas do poço para o cenário de 10000 anos.

Canal Retangular Econômico

Arquivo

Dados

Rugosidade composta ? ☐ Sim ☒ Não

Talude esquerdo

Talude Direito

Fundo

Coefficiente de Manning Selecionar ...

Declividade m/m

Profundidade (y) m

Largura da base (b) m

Vazão m³/s

Resultados

Rug. Equivalente	0,014
Área de Fluxo	0,02 m²
Perímetro Molhado	0,40 m
Raio Hidráulico	0,05 m
Velocidade média	0,68 m/s
Velocidade crítica	0,88 m/s
Profundidade média	0,10 m
Profundidade crítica	0,08 m
Declividade crítica	0,0097 m/m
Energia cinética	0,02 m
Energia Específica	0,12 m
Número de Froude	0,68

Escoamento Subcrítico

Calcular Apagar Relatório

Voltar

Fonte: Próprio autor (2025).

Conforme padrões da empresa, para as canaletas da casa de bombas é recomendado utilizar no mínimo duas vezes o valor encontrado para a profundidade, devido a possibilidade de acúmulo de sujeira e entupimento. Assim, ao considerar o cenário mais extremo e a adição dos 20 cm, as canaletas para a casa de bombas devem possuir dimensões de 20 cm de largura e 40 cm de altura. Esses valores devem ser o suficiente para garantir um bom funcionamento do sistema.

6 CONCLUSÃO

Através do estudo de análise desse caso de insegurança quanto à capacidade de contenção da bacia que envolve o tanque de armazenamento de soda cáustica, foi possível contribuir com resultados que acrescem o estudo e a problemática de vazamentos e contenções em áreas de controle de afluentes, e essa contribuição se faz ainda mais relevante quando se considera a baixa quantidade de trabalhos sobre a contenção em áreas de alocação de hidróxido de sódio. Assim, os dados obtidos forneceram resultados que auxiliam no contorno de um problema persistente e evidenciam a importância da previsão de parâmetros advindos de simulações, além da implementação de equipamentos, como bombas, e de infraestruturas, a exemplo de poços e canaletas, para o manejo de grandes quantidades de fluidos.

No que diz respeito à previsão de parâmetros, a simulação hidrológica realizada para as chuvas com tempo de retorno de 25, 1000 e 100000 anos forneceu a quantidade máxima de contribuição de água de chuva a qual a área de contenção é sujeita, trazendo a afirmação de que no pior cenário possível a quantidade de água de chuva é muito maior do que o volume do dique disponível para o afluente, sendo indispensável a construção de poços para alocação e o uso de bombas para manejo adequado. Além do mais, a simulação também auxiliou em encontrar a vazão ideal da bomba para cada cenário, respeitando os limites dado pela Regra da Bota, a fim de evitar contaminação de trabalhadores que possivelmente adentrarão a área.

No que tange a infraestrutura da área de contenção, o uso de poços e canaletas é crucial. Uma vez sabido que o volume de chuva do cenário de 25 anos já é suficiente para causar transbordo, os poços e canaletas tem papel de extrema importância ao alocar e ajudar no transporte da água, evitando colapso do sistema e eventuais problemas ambientais. Já com relação à análise das canaletas, foi visto que as atuais não são mais suficientes para o bom funcionamento do sistema, necessitando ajustar a profundidade das canaletas em vários centímetros.

O sistema da casa de bombas, por sua vez, também necessitou da implementação da infraestrutura com poços e canaletas com o intuito de evitar alagamento. Nisso, foi tido que as dimensões do poço são, por regra, menores que as dimensões previstas para a área de contenção, haja vista a menor quantidade de água de chuva que chega até o sistema; o mesmo podendo ser aplicada às canaletas. Devido às características do terreno, a análise e o dimensionamento dessa parte do sistema se fizeram tão importante quanto o estudo para a área de contenção.

Dessa forma, esse trabalho reforça a importância da previsão de resultados meteorológicos para a melhor abordagem de sistemas de drenagem e do manejo de

afluentes, além de salientar o caráter determinante de soluções de escoamento no processo de segurança e de bom funcionamento de redes de drenagem de sistemas tanque-bacia de contenção.

Em relação às etapas futuras, os cálculos foram avaliados pela empresa paraense com o objetivo de aplicar o dimensionamento realizado, sendo considerados adequados, especialmente quanto à metodologia adotada. Essa abordagem contempla a implementação de um sistema de drenagem indispensável — sobretudo no sistema da casa de bombas, local sujeito a infiltrações constantes — e também leva em conta cenários raros de chuva que possam eventualmente ocorrer.

Além disso, os cálculos realizados possuem papel estratégico para a segurança operacional do sistema de contenção de vazamentos. Ao serem fundamentados em tempos hidrológicos de chuva, eles permitem prever e dimensionar a capacidade necessária para lidar com eventos pluviométricos críticos, evitando transbordamentos e garantindo a integridade da infraestrutura. Essa previsão precisa é essencial para assegurar que, mesmo sob condições climáticas extremas, o sistema mantenha seu pleno funcionamento e proteja o ambiente contra potenciais danos.

REFERÊNCIAS

AFONSO, Clito. Termodinâmica para engenharia. FEUP edições, 2012.

ARAÚJO, Karla Santos de et al. Processos oxidativos avançados: uma revisão de fundamentos e aplicações no tratamento de águas residuais urbanas e efluentes industriais. *Revista Ambiente & Água*, v. 11, n. 2, p. 387-401, 2016.

ARGYROPOULOS, C. D. et al. A hazards assessment methodology for large liquid hydrocarbon fuel tanks. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, v. 25, n. 2, p. 329-335, 2012.

BACK, Álvaro José. Alternative model of intense rainfall equation obtained from daily rainfall disaggregation. *RBRH*, v. 25, p. e2, 2020.

BRAGA, Risete Maria Queiroz Leão et al. A utilização de uma camada de solo compactado como revestimento impermeabilizante de fundo de bacias de disposição de lama vermelha produzida em Barcarena-PA. 2010.

CANHOLI, Aluísio. Drenagem urbana e controle de enchentes. Oficina de textos, 2015.

CHEN, Cheng-lung. Rainfall intensity-duration-frequency formulas. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 109, n. 12, p. 1603-1621, 1983.

CHEN, Cheng-lung. Rainfall intensity-duration-frequency formulas. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 109, n. 12, p. 1603-1621, 1983.

COLEGIADA, Diretoria et al. Agência Nacional de Águas-ANA.

DE AMORIM, Simar Vieira; DE ANDRADE PEREIRA, Daniel José. Estudo comparativo dos métodos de dimensionamento para reservatórios utilizados em aproveitamento de água pluvial. *Ambiente Construído*, v. 8, n. 2, p. 53-66, 2008.

DE CARVALHO, Fabiana Ferreira et al. ANÁLISE QUANTITATIVA DE SISTEMA DE DRENAGEM URBANA SUSTENTÁVEL:: JARDIM DE CHUVA-RJ. ENCONTRO LATINO AMERICANO E EUROPEU SOBRE EDIFICAÇÕES E COMUNIDADES SUSTENTÁVEIS, p. 468-480, 2021.

DEZOTTI, Márcia. Processos e técnicas para o controle ambiental de efluentes líquidos: Volume 5 da Série Escola Piloto de Engenharia Química. Editora E-papers, 2008.

DUAN, Haisheng et al. Removal routes of hazardous sodium oxalate in the alumina industry based on Bayer process: A review. *Chemical Engineering Research and Design*, v. 205, p. 13-27, 2024.

FONSECA, Filomena Pugliese. As águas do passado e os reservatórios do Guaraú, Engordador e Cabuçu: um estudo de arqueologia industrial. 2008.

GALVÃO, Wougran Soares; MENESES, Paulo Roberto. Avaliação dos sistemas de classificação e codificação das bacias hidrográficas brasileiras para fins de planejamento de redes hidrométricas. *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR)*, v. 12, p. 2511-2518, 2005.

GEROTO, Regis Eduardo; REBELO, Karla Maria Wingler; VILAR, Orêncio Monje. Desempenho de camadas de proteção para geomembranas empregadas como barreiras de desvio de fluxo. *Anais*, 2008.

GIORDANO, Gandhi et al. Tratamento e controle de efluentes industriais. *Revista ABES*, v. 4, n. 76, p. 1-84, 2004.

METCALF, Leonard; EDDY, Harrison P. Tratamento de efluentes e recuperação de recursos. McGraw Hill Brasil, 2015.

MÜLLER, Werner W.; SAATHOFF, Fokke. Geosynthetics in geoenvironmental engineering. *Science and technology of advanced materials*, v. 16, n. 3, p. 034605, 2015.

NAGHETTINI, Mauro; PINTO, Éber José de Andrade. Hidrologia estatística. CPRM, 2007.

OLIVEIRA, Jeferson de et al. Anticorrosive coatings for storage tanks; Revestimentos anticorrosivos para tanques de armazenamento de petroquímicos. 2008.

PASTRE, Iêda Aparecida et al. Reações ácido-base: conceito, representação e generalização a partir das energias envolvidas nas transformações. *Química Nova*, v. 35, p. 2072-2075, 2012.

PEREIRA, Kariny de Fátima Xavier; DE OLIVEIRA, Paulo José Pereira. Dissolução de NaOH em água: experimentação como proposta de abordagem interdisciplinar para Física e Química no Ensino Médio utilizando ensino por investigação. *A Física na Escola*, v. 23, p. e230106-e230106, 2025.

RIDDICK, John M. Hazards of Sodium Hydroxide. Loss Prevention Bulletin, n. 271, 2020.
SCHEIRS, John. A guide to polymeric geomembranes: a practical approach. John Wiley & Sons, 2009.

TUCCI, Carlos EM; COLLISCHONN, Walter. Drenagem urbana e controle de erosão. VI Simpósio nacional de controle da erosão, Presidente Prudente, São Paulo, 1998.

VAN SANTVOORT, Gerard PTM (Ed.). Geotextiles and geomembranes in civil engineering. CRC Press, 1994.