

FG-2201-NHB-A-BA-RT24-02

À

NORSK HYDRO BRASIL

Av. Gentil Bittencourt, 549

Belém – PA

A/C

CAROLINA VARKALA

Departamento de Suprimentos de Bauxita & Alumina

Referência: Segurança e estabilidade dos depósitos de resíduos sólidos – DRS1 e DRS2**Local:** Barcarena – PA

Prezada,

Apresentamos o relatório técnico de avaliação da compatibilidade do projeto executivo do depósito DRS2 com a sua efetiva execução, em atendimento à letra “A” do Termo de Compromisso de Ajustamento de Conduta, celebrado entre a HYDRO, ALUNORTE e o Ministério Público do Estado do Pará (MPPA), Ministério Público Federal (MPF), o Estado do Pará e a Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade do Estado do Pará. O DRS2 está localizado junto a produção da Alunorte, no município de Barcarena – PA.

À disposição para esclarecimentos julgados necessários,

Belo Horizonte, 03 de agosto de 2023

Atenciosamente,


Michel Fontes
DIRETOR
FONNTES GEOTÉCNICA



FONNTES
G E O T É C N I C A

FG-2201-NHB-A-BA-RT24-02

RELATÓRIO TÉCNICO DE AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DO PROJETO EXECUTIVO DO DRS2

CLIENTE:



PROJETO:

**AUDITORIA DE SEGURANÇA E
ESTABILIDADE DOS DEPÓSITOS DE
RESÍDUOS SÓLIDOS DRS1 E DRS2**

BARCARENA - PA



agosto/2023

AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DO PROJETO EXECUTIVO DO DRS2

REV.	DATA	POR	REVISÃO	APROV.	DESCRIÇÃO DE REVISÕES
0	11/07/22	BSC/RCM /RCJ	ACS/ BCN	ACS	EMISSÃO INICIAL
1	14/04/22	BSC/RCM /RCJ	ACS/ BCN	ACS	ATENDIMENTO A COMENTÁRIOS
2	03/08/23	BSC/RCM /RCJ	ACS/ BCN	ACS	APROVADO

Esta é a folha de controle de revisões deste documento. Uma breve descrição de cada revisão do documento deverá constar nesta folha. O tipo de emissão está demarcado abaixo em negrito.

TE – TIPO DE EMISSÃO

(A) PRELIMINAR

(E) PARA CONSTRUÇÃO

(B) PARA APROVAÇÃO

(F) CONFORME COMPRADO

(C) PARA CONHECIMENTO

(G) CONFORME CONSTRUÍDO

(D) PARA COTAÇÃO

(H) CANCELADO

AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DO PROJETO EXECUTIVO DO DRS2**SUMÁRIO**

GLOSSÁRIO	1
1. INTRODUÇÃO	3
2. OBJETIVO.....	6
3. DADOS UTILIZADOS	8
4. ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO	9
5. APRESENTAÇÃO DO PROJETO DA ESTRUTURA.....	10
5.1 LOCALIZAÇÃO	12
5.2 ASPECTOS GEOLÓGICOS	17
5.2.1 <i>Geologia Regional</i>	17
5.2.2 <i>Histórico de Investigações</i>	19
5.2.3 <i>Geologia Local</i>	20
5.3 PLATAFORMA DA PILHA DE RETOMADA DO RESÍDUO E CÉLULA DE CONTINGÊNCIA.....	21
5.4 CANAIS DE CONTORNO E BACIAS DE CONTROLE (BC 201 E BC 202)	22
5.5 DIQUE DE CONTORNO.....	24
5.6 DIQUE ENTRE CANAL DE CONTENÇÃO DE SEDIMENTOS E CANAL DE ADUÇÃO DAS BACIAS DE CONTROLE	24
5.7 DIQUE EXTERNO DO CANAL DE ADUÇÃO DAS BACIAS DE CONTROLE	24
5.8 DIQUE EXTERNO DAS BACIAS DE CONTROLE (BC 201 E BC 202)	25
5.9 DIQUE DE CONTENÇÃO DA ÁREA ÚMIDA	25
5.10 DIQUE CENTRAL E FINGERS	26
5.11 SISTEMA DE IMPERMEABILIZAÇÃO.....	27
5.12 DRENAGEM INTERNA DA PILHA	28
5.13 INSTRUMENTAÇÃO.....	30
5.14 SISTEMA EXTRAVASOR.....	30
5.15 GALERIA DE TRANSPOSIÇÃO DO CANAL DE ADUÇÃO	32
5.16 DRENAGEM SUPERFICIAL	32
5.17 PROJETO <i>AS BUILT</i>	32
6. METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO	33
7. DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO.....	35
7.1 TRATAMENTO DE FUNDAÇÃO.....	35
7.2 SISTEMA DE IMPERMEABILIZAÇÃO.....	39

AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DO PROJETO EXECUTIVO DO DRS2

7.2.1	<i>Diretrizes estabelecidas em projeto.....</i>	<i>39</i>
7.2.2	<i>Interpretação de testes relativos à aplicação de materiais sobre a geomembrana.....</i>	<i>39</i>
7.2.3	<i>Interpretação dos ensaios para verificação da estanqueidade da geomembrana.....</i>	<i>41</i>
7.3	CONTROLE CONSTRUTIVO DOS DIQUES DE CONTORNO.....	44
7.4	ESTABILIDADE FÍSICA E ESTRUTURAL	51
7.5	GESTÃO DE ÁGUAS SUPERFICIAIS	56
7.5.1	<i>Dimensionamento dos sistemas extravasores.....</i>	<i>61</i>
7.5.1.1	Sistema extravasor da área úmida	61
7.5.1.2	Sistema extravasor da faixa estrutural.....	64
7.5.1.3	Bombeamento das bacias BC201 e BC202 e célula de emergência	67
7.5.2	<i>Drenagem superficial.....</i>	<i>74</i>
7.5.3	<i>Considerações da Fonntes</i>	<i>76</i>
8.	CONCLUSÕES	80
8.1	TRATAMENTO DE FUNDAÇÃO	80
8.2	SISTEMA DE IMPERMEABILIZAÇÃO	81
8.3	CONTROLE CONSTRUTIVO DOS DIQUES DE CONTORNO	83
8.4	ANÁLISES DE ESTABILIDADE	83
8.5	GESTÃO DAS ÁGUAS SUPERFICIAIS.....	84
9.	REFERÊNCIAS	85

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DO PROJETO EXECUTIVO DO DRS2		

GLOSSÁRIO

- “As Built” – “Como Construído” – expressão para definir o projeto que descreve o estado imediatamente após a implantação de uma estrutura.
- “As Is” – “Como está” – expressão para definir o projeto que descreve o estado atual de uma estrutura
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- Alunorte – Alumina do Norte do Brasil S.A. – empresa brasileira formada a partir de acordo bilateral pelos governos do Brasil e do Japão em 1976. Empresa produtora de alumina, responsável pela operação e manutenção do DRS 1 e DRS 2, signatária do TAC 3.1 e subsidiária da Hydro.
- ANA – Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico
- BC – Bacias de Controle
- CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais / Serviço Geológico do Brasil
- DOE – Diário Oficial do Estado
- DRS 1 – Depósito de Resíduos Sólidos nº 1 de propriedade da ALUNORTE
- DRS 2 - Depósito de Resíduos Sólidos nº 2 de propriedade da ALUNORTE
- ETEI – Estação de Tratamento de Efluentes Industriais
- FONNTES – Fonntes geotécnica Ltda – Empresa vencedora do edital para contratação de auditoria independente para atendimento ao item 3.1, do TAC 3.1.
- Hydro – Norsk Hydro ASA – Empresa Norueguesa, que tem na produção de alumínio o seu principal negócio e signatária do TAC 3.1.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DO PROJETO EXECUTIVO DO DRS2

- MPF – Ministério Público Federal
- MPPA – Ministério Público do Estado do Pará
- MPSA – Mineração Paragominas
- MRN – Mineração Rio Norte
- NBR – Norma Brasileira
- NSPT – Número de golpes necessários para à cravação de amostrador de sondagem à percussão (spt), considerando apenas os 30 cm finais
- PA – Estado do Pará
- PEAD – Polietileno de alta densidade
- SEMAS – Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade do Pará
- SPT - Ensaio de penetração padrão conforme a norma ABNT NBR 6484:2020.
- TAC 3.1 – item do Termo de Ajustamento de Conduta relativo à “Auditoria de segurança e estabilidade dos depósitos de resíduos sólidos”, assinado pela HYDRO, ALUNORTE, Ministério Público do Pará, Ministério Público Federal e Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade do Pará.
- UTM – Universal Transversa de Mercator (Sistema de projeção cartográfica)

1. INTRODUÇÃO

A Norsk Hydro ASA (HYDRO) fundada em 1905 é uma empresa norueguesa com atuação em 40 países nos setores da mineração, industrial e de energia. O Brasil é a principal fonte de matéria-prima do alumínio da HYDRO, a bauxita, extraída em Paragominas e Trombetas (PA). A bauxita é refinada e convertida em alumina (óxido de alumínio) na Alunorte, localizada no município de Barcarena (PA), que é a maior refinaria de alumina do mundo fora da China. Este processo gera um resíduo que é lavado, filtrado e armazenado em depósitos de resíduos sólidos (DRS1 e DRS2), apresentados na Figura 1.1.



Figura 1.1 – Localização do empreendimento.

Neste contexto, a Fonntes Geotécnica (FONNTES) foi contratada por meio do Edital de Contratação de Serviços de Auditoria de Segurança e Estabilidade dos Depósitos de Resíduos Sólidos DRS1 e DRS2. O objeto do contrato se trata da prestação do serviço de elaboração de auditoria da segurança e estabilidade dos depósitos de resíduos sólidos

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DO PROJETO EXECUTIVO DO DRS2		

- DRS1 e DRS2, do termo de compromisso de ajustamento de conduta, Inquérito Civil - IC nº 001/2018 - MP (SIMP nº000654 -710/2018) MPPA, Inquérito Civil nº 000980 - 040/2018 (Portaria no 12/2018) MPPA, Inquérito Civil no 1.23.000.000498/2018 - 98 MPF.

Os relatórios a serem elaborados pela FONNTES atenderão plenamente aos requisitos do Termo de Compromisso de Ajustamento de Conduta, celebrado entre a HYDRO, ALUNORTE e o Ministério Público do Estado do Pará (MPPA), Ministério Público Federal (MPF), o Estado do Pará e a Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade do Estado do Pará, incluindo:

- a) **Compatibilidade do projeto executivo dos depósitos (DRS1 e DRS2) com a sua efetiva execução;**
- b) Compatibilidade dos Depósitos de Resíduos Sólidos (DRS1 e DRS2) com a Lei Nacional de Segurança de Barragens (Lei n.º 12.334/2010);
- c) Aspectos estruturais Depósitos de Resíduos Sólidos (DRS1 e DRS2), a concepção geral do projeto, o arranjo e dimensionamento das estruturas, além de suas funcionalidades;
- d) Análise qualitativa de instrumentação com vistas a determinação da densidade de drenagem, a fim de aferir o comprometimento das águas superficiais e subterrâneas;
- e) Avaliação da compatibilidade da localização dos DRS com o projeto, obedecendo à legislação aplicável, às normas ambientais e aos critérios econômicos, geotécnicos, estruturais, sociais e de segurança e risco, mediante necessidade de segurança estrutural, bem como considerando a possibilidade de existência de drenagens naturais possivelmente afetadas, tais como mananciais e olhos d'água;
- f) Análise da viabilidade da concepção proposta, em termos operacionais e manutencionais, ou seja, se os processos de controle necessários à disposição

AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DO PROJETO EXECUTIVO DO DRS2

- dos rejeitos da forma concebida são compatíveis com a estrutura existente e consequente produção dos rejeitos, levando em consideração as condições ambientais locais;
- g) Verificação da densidade e teor de umidade ótimo (período chuvoso e período seco) e suas variações, envolvendo valor médio e desvio padrão durante a fase de testes;
 - h) Revisão dos parâmetros geotécnicos de coesão e ângulo de atrito efetivo, a partir de ensaios de laboratório e de campo, e suas variações envolvendo valor médio e desvio padrão durante a fase de testes;
 - i) Análise de estabilidade, através de parâmetros geotécnicos (programas-slope/W1 e ensaios – Laboratórios de Geotecnia), e estanqueidade. Determinação do Fator de segurança, seu valor médio e seu grau de confiabilidade, após o período de testes;
 - j) Análise de estabilidade dos depósitos, utilizando-se como referência os fatores de segurança mínimos descritos na Norma ABNT NBR 13.028/2017, e Norma ABNT NBR 13029/2017
 - k) Revisão do projeto e disposição de drenos, filtros, medidores de vazão e seus processos executivos;
 - l) Revisão do Projeto de revestimento e monitoramento dos taludes;
 - m) Verificação do teor de umidade do material que condicionará a decisão de lançá-lo na área úmida ou aplicá-lo na área seca e suas variações ao longo do período de testes;
 - n) Interpretação dos resultados dos testes relativos à aplicação do material sobre as geomembranas;
 - o) Interpretação dos ensaios destrutivos e não destrutivos para verificação da estanqueidade da Geomembrana;
 - p) Análise e adequação da suficiência do Plano de Ação Emergencial, o qual deverá contemplar a identificação e análise das possíveis/situações de emergência; os procedimentos para identificação e notificação de mau funcionamento ou de

AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DO PROJETO EXECUTIVO DO DRS2

condições potenciais de ruptura dos depósitos; os procedimentos preventivos e corretivos a serem adotados em situações de emergência, com indicação do responsável pela ação; a estratégia e meio de divulgação e alerta para as comunidades potencialmente afetadas em situação de emergência, utilizando-se como referência a Instrução Normativa nº02/2018, publicada no DOE nº 33.554, de 07 de fevereiro de 2018 e conforme estabelecido no Art. 12 da Lei nº 12.334 de 20 de setembro de 2010.

Nesse contexto, o presente relatório apresenta os estudos realizados para atendimento do item **a)**, referido à avaliação da compatibilidade do projeto executivo do depósito de resíduos sólido DRS2 com a sua efetiva execução.

2. OBJETIVO

Em atendimento ao termo de compromisso de ajustamento de conduta, Inquérito Civil - IC nº 001/2018 - MP (SIMP nº000654 -710/2018) MPPA, Inquérito Civil nº 000980 - 040/2018 (Portaria no 12/2018) MPPA, Inquérito Civil no 1.23.000.000498/2018 - 98 MPF, o presente documento abordará o item **“a) Compatibilidade do projeto executivo dos depósitos (DRS1 e DRS2) com a sua efetiva execução;”** para o depósito de resíduos DRS2.

Ao se iniciar os serviços foram realizadas reuniões com o MPPA para alinhamento do escopo das letras do TAC 3.1. Essas reuniões ensejaram no envio de um ofício elaborado pela FONNTES com esclarecimentos do entendimento técnico das perguntas para adequado encadeamento das atividades. Posteriormente foi recebido o “de acordo” do MPPA para elaboração dos serviços seguindo o raciocínio apresentado no ofício, que passou a ser utilizado como referência para elaboração de todos os relatórios. Vale destacar que esse esclarecimento foi muito importante para o direcionamento dos

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DO PROJETO EXECUTIVO DO DRS2		

serviços, porque em alguns casos havia perguntas com temas que teriam melhor abordagem em outras letras do TAC 3.1 ou ainda em outras cláusulas que não eram escopo do presente trabalho. Abaixo é reproduzido o extrato do ofício com a explicação do entendimento para resposta da pergunta **letra A)**, objeto desse relatório.

Essa é o item mais abrangente na autoria. Corresponde uma análise ampla do projeto dos DRS1 e DRS2 em relação ao que de fato foi construído em campo. Os estudos técnicos vão verificar e responder os seguintes pontos, para ambas as estruturas:

✓ Será verificado se o(s) tratamento(s) de fundação foram projetados e executados adequadamente;

✓ Será verificado se o dimensionamento do sistema de impermeabilização (geomembrana de PEAD) foi realizado conforme critérios consagrados de engenharia. Nota: a verificação dos controles tecnológicos de construção (ensaios de campo e laboratório) será respondido no item O);

✓ Os Diques de Contorno serão verificados quando os critérios de projetos e boas práticas de engenharia do ponto de vista construtivo e estrutural;

✓ Será verificado a segurança da estrutura do ponto de vista da estabilidade física e estrutural, através de análise de estabilidade já disponíveis, realizados por outras empresas que auditaram as estruturas ao longo do tempo, considerando as resistências dos materiais dos Diques de Contorno e dos Resíduos sólidos armazenados. Na ausência de uma normatização específica no Brasil para esse tipo de estrutura, será verificada a experiência internacional e os resultados de estabilidade serão avaliados ao que recomenda as normas ABNT NBR 13.028 e ABNT NBR 13.029, naquilo que for aplicável, em relação aos critérios geotécnicos. Nota: Nessa resposta não serão conduzidas novas análises de estabilidade, o parecer será realizado através das análises já realizadas ao longo do tempo por outras empresas que auditaram as estruturas. No item I) está prevista uma verificação mais detalhada e exclusiva aos modelos computacionais elaborados para se calcular a estabilidade;

✓ Será verificado se a solução hidráulica para as águas superficiais são adequadas, conforme critérios consagrados de engenharia, para suportar eventos chuvosos extremos sem que ocorram trasbordamentos. Esse aspecto necessitará também da verificação dos critérios operacionais, constante nos manuais de operação das bacias utilizadas para armazenamento e bombeamento das águas de chuva para estação de tratamento. A capacidade volumétrica das baias e a capacidade de

AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DO PROJETO EXECUTIVO DO DRS2

bombeamento serão verificadas quanto sua adequação técnica. Na ausência de uma normatização específica no Brasil para esse tipo de estrutura, será verificada a experiência internacional e as normas ABNT NBR 13.028 e ABNT NBR 13.029, naquilo que for aplicável, em relação os critérios hidrológicos e hidráulicos;

3. DADOS UTILIZADOS

Foi recebido um volume elevado de informações enviadas pela HYDRO à FONNTES. Os dados consultados efetivamente para avaliação nesse relatório são apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Documentos utilizados para elaboração desse relatório

CÓDIGO	TÍTULO DO DOCUMENTO	ELABORADO POR	DATA
RT-3540-54-G-1014 R02	Relatório Técnico do Projeto “As Is”	PIMENTA DE AVILA	Jul/21
MD-3541-54-G-096- R00	Memorial descritivo do projeto detalhado do Depósito	PIMENTA DE ÁVILA CONSULTORIA LTDA	Set/2015
D1-3541-54-G-102- R01	Planta geral da área do DRS2	PIMENTA DE ÁVILA CONSULTORIA LTDA	Nov/2015
D1-3541-54-G-104- R04	Layout - Planta	PIMENTA DE ÁVILA CONSULTORIA LTDA	Nov/2015
RT-3541-54-G-360 R01	“Como Construído” do sistema de disposição de resíduos DRS2 – Fase 1	PIMENTA DE ÁVILA CONSULTORIA LTDA	Jul/2018
DB-3541-54-G-098	Memória de Cálculo dos estudos hidrológicos e hidráulicos do DRS2 – fase 1	PIMENTA DE ÁVILA CONSULTORIA LTDA	Ago/2015
RT-3540-54-G-881	Sinopse climática	PIMENTA DE ÁVILA CONSULTORIA LTDA	Jun/2009
RT-3541-54-G-451	Relatório técnico das considerações sobre o “Como Construído” da infraestrutura inicial do DRS2 – fase 1	PIMENTA DE ÁVILA CONSULTORIA LTDA	Set/2020
RT-469133-54-G- 003	Atualização dos estudos de chuvas intensas	GWS Engenharia	Nov/2021
RT-469133-54-G- 005	Avaliação da segurança do DRS2 frente à passagem de cheias no período chuvoso 2021/2022 – resultados das modelagens	GWS Engenharia	Dez/2021

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DO PROJETO EXECUTIVO DO DRS2		

4. ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

Durante a definição da estrutura dos documentos a serem produzidos para a auditoria foi estabelecido que todos os relatórios apresentariam capítulos básicos introdutórios, que pudessem contextualizar qualquer leitor, independentemente do acesso a outros relatórios dessa auditoria. Por isso, optou-se por reproduzir em todos os documentos um conteúdo introdutório que permita ao leitor o entendimento básico da localização, geologia e fisiografia do projeto da estrutura em avaliação. Este conteúdo introdutório comum a todos os relatórios de cada letra específica do Termo de Ajustamento de Conduta (TAC 3.1) contempla os itens 1 a 5.

Nestes termos, o presente relatório foi organizado da seguinte forma:

- Introdução, contendo apresentação do documento e do TAC 3.1 que resultou no contrato para auditoria documental;
- Objetivos do presente documento, indicando a letra específica da TAC 3.1 que será atendida;
- Dados utilizados/consultados para o atendimento à letra específica da TAC 3.1;
- Explicações sobre a organização do documento;
- Apresentação da estrutura em estudo, nivelando o conhecimento básico do leitor sobre o tema;
- Metodologia de avaliação da letra relativa ao presente relatório;
- Desenvolvimento dos estudos relativos à letra do presente relatório;
- Considerações finais;
- Referências bibliográficas.

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DO PROJETO EXECUTIVO DO DRS2		

5. APRESENTAÇÃO DO PROJETO DA ESTRUTURA

O DRS2 foi projetado para armazenar resíduo da produção de alumina (resíduo de bauxita) (gerado pela refinaria da Hydro Alunorte) depois de filtrado por filtros prensa. Na Figura 5.1 é apresentado o Layout da fase 1 (fase atual) do DRS2, o qual é constituído de:

- Reservatório de resíduo úmido;
- Reservatório de resíduo seco (com dique central e fingers);
- Plataforma da pilha de retomada;
- Célula de Contingência;
- Canal de contenção de sedimentos;
- Canal de adução das bacias de controle;
- Bacias de controle BC 201 e BC 202

A função de cada estrutura do DRS2 será detalhada mais adiante, neste mesmo capítulo.

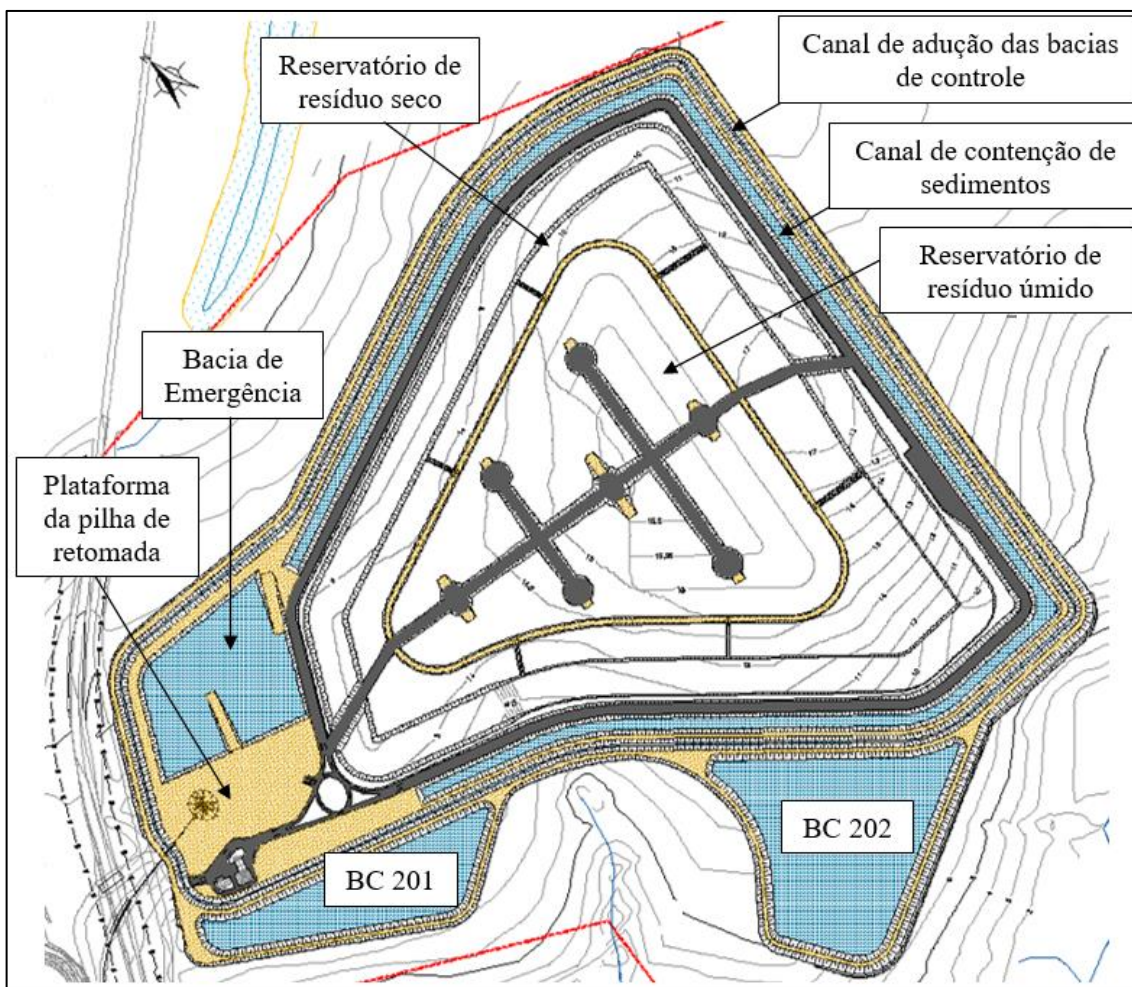


Figura 5.1 – Layout da fase 1 do DRS2 (MD-3541-54-G-096)

Neste item será apresentada a localização do depósito de resíduos sólidos DRS2 e em seguida o mesmo será caracterizado de acordo com o Memorial Descritivo do projeto detalhado do DRS2 Fase 01, documento MD-3541-54-G-096, elaborado pela Pimenta de Ávila Consultoria, revisão 17 de setembro de 2015. Para caracterização da estrutura também é utilizado o relatório As Built do projeto detalhado do DRS2, elaborado pela Pimenta de Ávila Consultoria LTDA, documento RT-3541-54-G-360 R01, revisão 01 de julho de 2018. Ressalta-se aqui que apenas a fase 01 do DRS2 foi executada até o momento.

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DO PROJETO EXECUTIVO DO DRS2		

5.1 Localização

Localizado no município de Barcarena, no estado do Pará, o sistema de disposição de resíduos pertencente à ALUNORTE é composto pelos Depósitos de Resíduos Sólidos DSR1 e DSR2 e situa-se em torno das coordenadas UTM/DATUM SIRGAS 2000 754.812m E 9.828.482m S.

Os depósitos se encontram a uma distância de, aproximadamente, 120 km da capital Belém, e o acesso se dá pela rodovia estadual PA-481. A planta industrial da ALUNORTE em Barcarena apresenta influência mundial na produção de alumina, colaborando para o desenvolvimento da região.

Logo a jusante dos depósitos DRS1 e DRS2 estão localizadas a bacia hidrográfica do rio Murucupi e diversas comunidades que direta ou indiretamente possuem influência do empreendimento.

A Figura 5.2 apresenta o mapa de localização do sistema de disposição de resíduos, indicando os Depósitos DRS1 e DRS2.

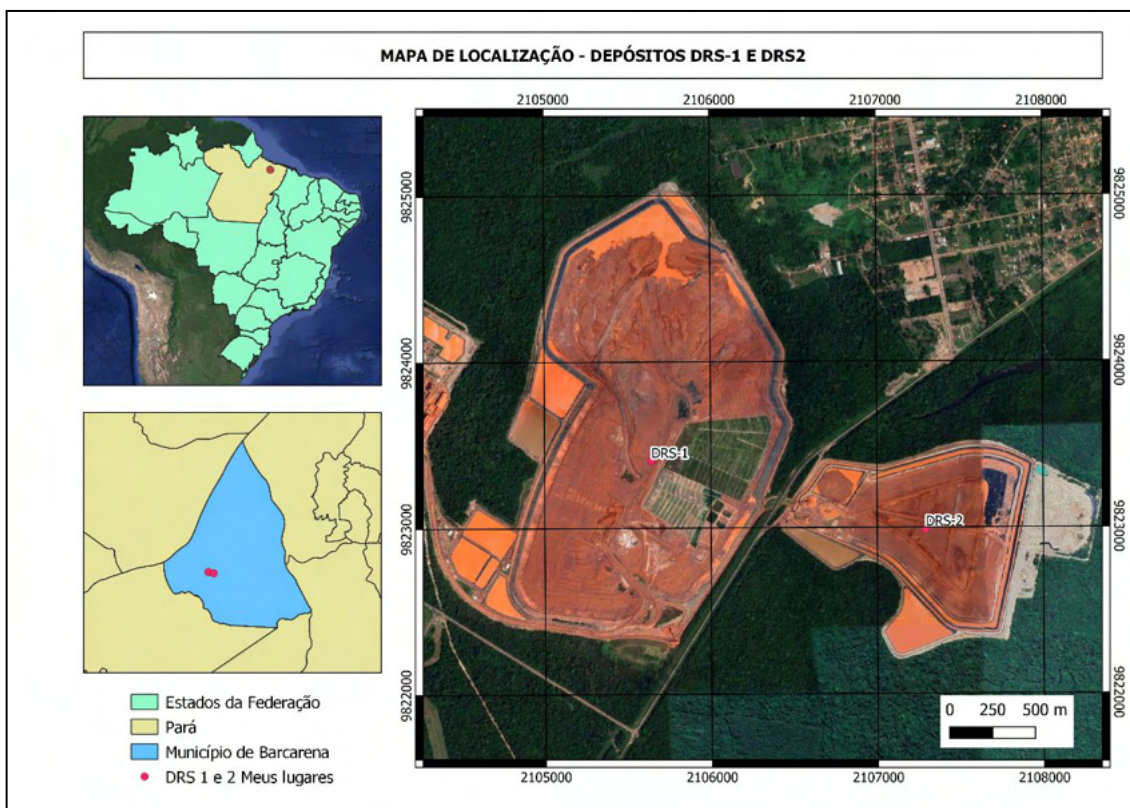
AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DO PROJETO EXECUTIVO DO DRS2


Figura 5.2 – Localização da Estrutura – DRS1 e DRS2

O município de Barcarena está localizado no bioma Amazônia, apresentando 1.310,34 km² de área (IBGE, 2021). Apresenta esgotamento sanitário adequado para 27,8% de seus habitantes (IBGE, 2010).

A estação chuvosa do município de Barcarena é compreendida entre os meses dezembro e junho, sendo que os meses em que são identificados maiores volumes precipitados se concentram entre janeiro e maio.

Segundo o levantamento censitário realizado pelo IBGE (2010), o município de Barcarena possui 99.859 habitantes, apresentando densidade demográfica de 76,21 habitantes por quilômetro quadrado. Conforme Figura 5.3 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, identificam-se as comunidades Água Verde, Cabeceira Grande, Caravelas

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DO PROJETO EXECUTIVO DO DRS2		

1, Caravelas 2 Jardim das Palmeiras, Laranjal, Massarapó, Nazaré, Nestor Campos e Vila São Francisco.

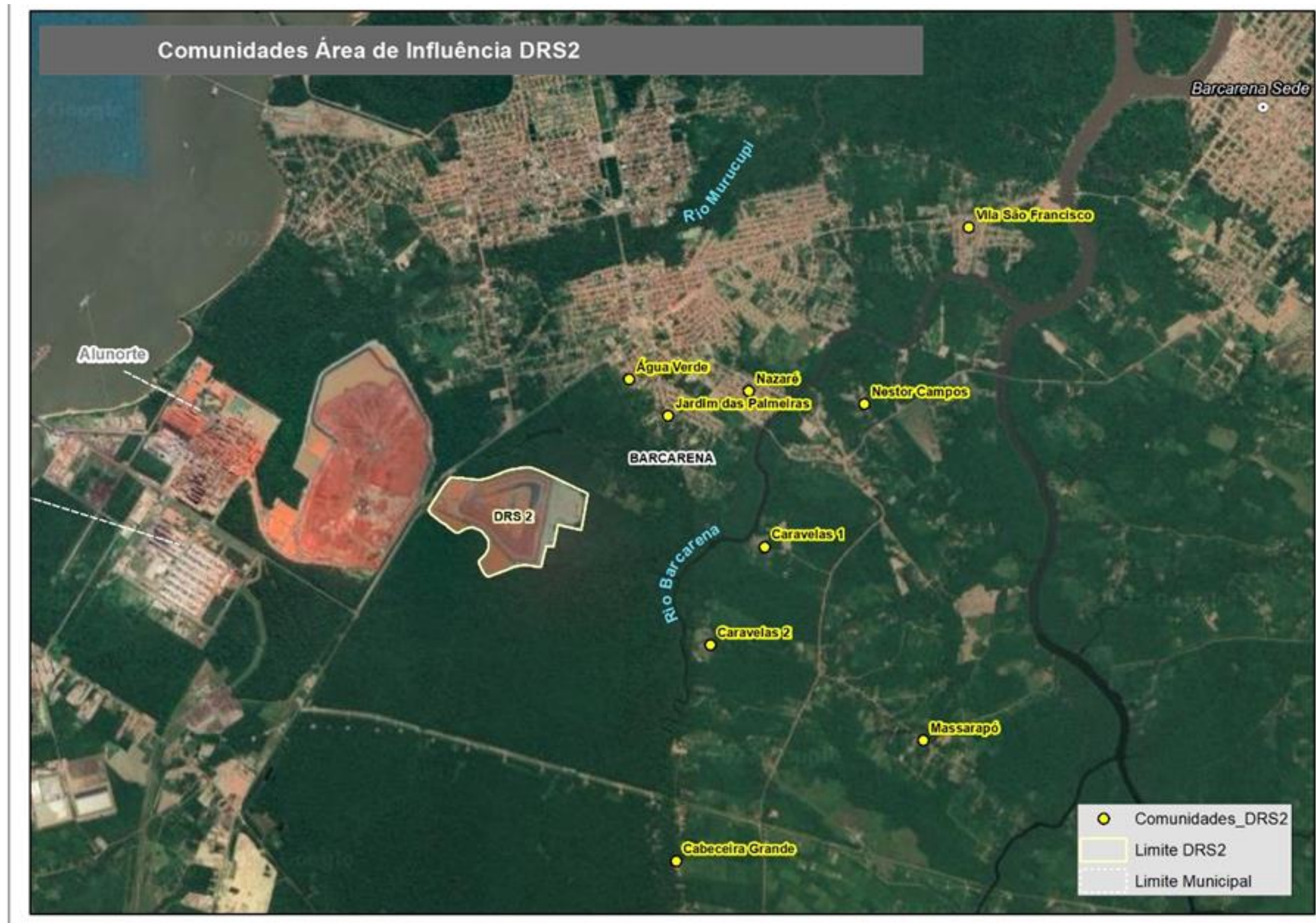


Figura 5.3 – Localização das comunidades próximas ao depósito DRS2 (Imagem fornecida pela equipe técnica da HYDRO/ALUNORTE)

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DO PROJETO EXECUTIVO DO DRS2		

Conforme apresentado por IBGE (2020), no ano de 2020 o salário médio mensal era de 2,8 salários-mínimos, com 22,5% da população com emprego formal. A taxa de escolarização de crianças entre 6 e 14 anos foi de 97,3% (IBGE, 2010b)

Em relação à economia do município, o PIB per capita de 2019 foi de R\$ 43.063,73, sendo 71% oriundo de fontes externas (IBGE, 2019), o IDHM do município é de 0,662 (IBGE, 2010).

A Nota Técnica “Contextualização sobre o histórico de expansões dos depósitos de resíduos sólidos – DRS1 e DRS2” (documento DT-3542-54-G-001) apresenta o histórico de implantação e expansão do DRS1 e DRS2. Esse histórico é replicado aqui visando contextualizar o leitor (Figura 5.4).

AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DO PROJETO EXECUTIVO DO DRS2

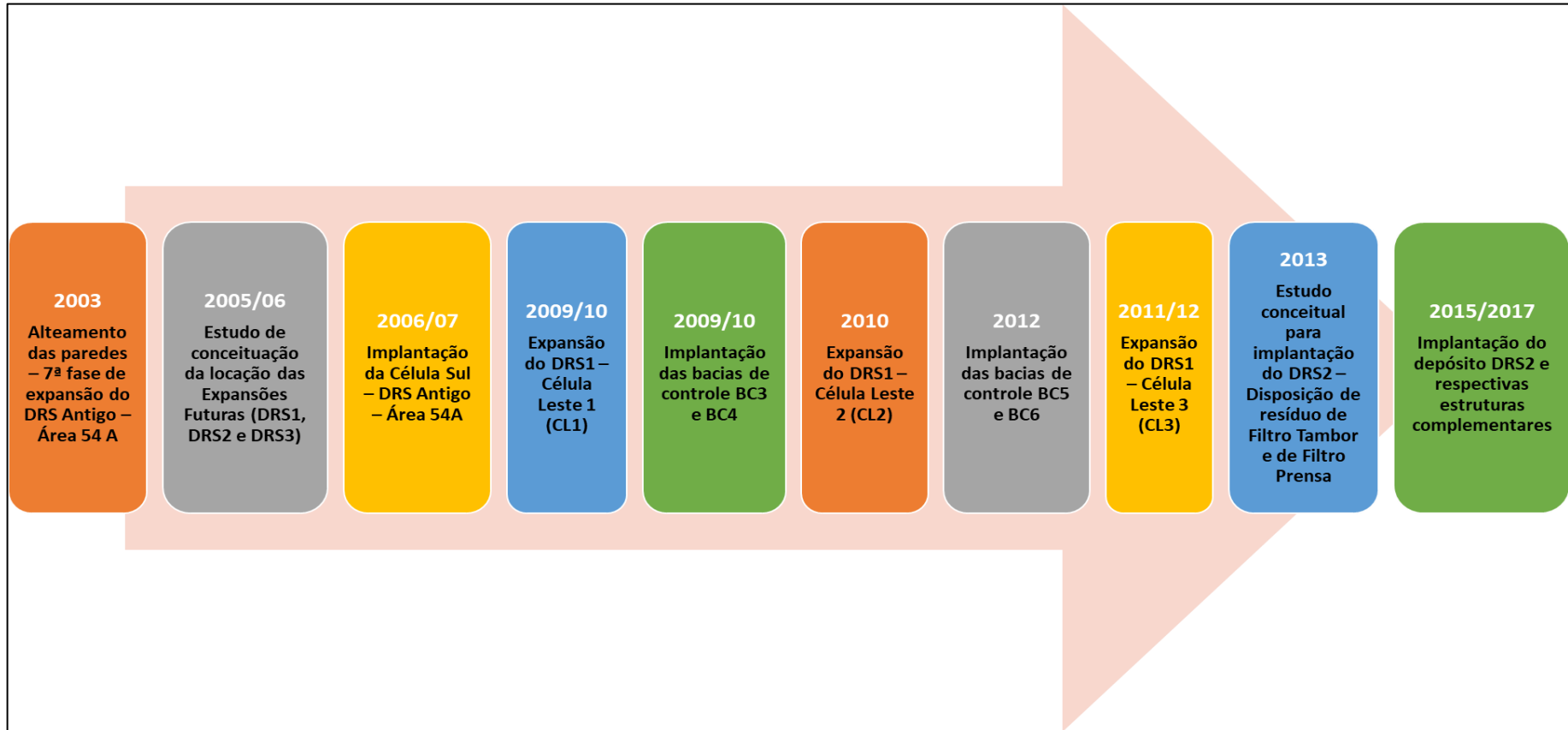


Figura 5.4 – Histórico de expansão do DRS1 e DRS2

A descrição das estruturas do DRS2 é apresentada a seguir com base no memorial descritivo do projeto (MD-3541-54-G-096) e relatório As Built (RT-3541-54-G-360 R01_AN-561-RL-47252-00).

5.2 Aspectos Geológicos

5.2.1 Geologia Regional

A área de estudo encontra-se inserida no contexto dos sedimentos cenozóicos (< 65,5 milhões de anos) individualizados nas formações: Pirabas e Barreiras, bem como dos sedimentos quaternários (denominados de sedimentos pós Barreiras).

Conforme apresentado no Mapa Geológico do Estado do Pará, desenvolvido pela CPRM em 2008 (Figura 5.5), a estrutura DRS2 encontra-se sobre Sedimentos Pós-Barreiras. Ocupando uma área de aproximadamente 12000 m², que se estende à faixa litorânea entre as cidades de Bragança e Belém avançando para o interior do Pará, a Formação Pirabas ocorre sobreposta ao embasamento cristalino (Almaraz, 1977) e é caracterizada pela composição calcária e conteúdo fossilífero. A deposição se fez por evento transgressivo decorrente da subida do nível do mar em todo o planeta, durante o Mioceno (Haq *et al.* 1987). Sucedendo ao evento transgressivo que resultou na Formação Pirabas, ocorreu um evento de caráter regressivo o qual foi responsável pela sedimentação do Grupo Barreiras.

O Grupo Barreiras, também denominado por alguns autores de Formação Barreiras, aflora na costa brasileira, quase continuamente desde o Pará até o Rio de Janeiro. O grupo é constituído por sedimentos de origem continental pouco litificados, oriundos da ação do intemperismo e ciclos geológicos ocorridos no interior do continente após a abertura do Atlântico (MABESOONE e CASTRO, 1975). Os estratos apresentam variações verticais e laterais bem-marcadas que variam em níveis arenosos, argilo arenosos,

AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DO PROJETO EXECUTIVO DO DRS2

conglomeráticos e ferruginosos. Os sedimentos quaternários Pós-Barreiras recobrem discordantemente essas sequências.

Admite-se como Sedimentos Pós Barreiras os depósitos que recobrem de maneira discordante os estratos da Formação Barreiras. Trata-se de areias consolidadas e semi-consolidadas de granulometria fina a média e coloração creme amarelada a branca, podendo conter clastos e frações de argila (Farias *et al.* 1992). Segundo Rosseti e Valeriano (2007) a evolução desses sedimentos está relacionada a um paleovale de idade quaternária alimentado pelo Rio Tocantins, quando esse corria para oeste do seu curso atual.

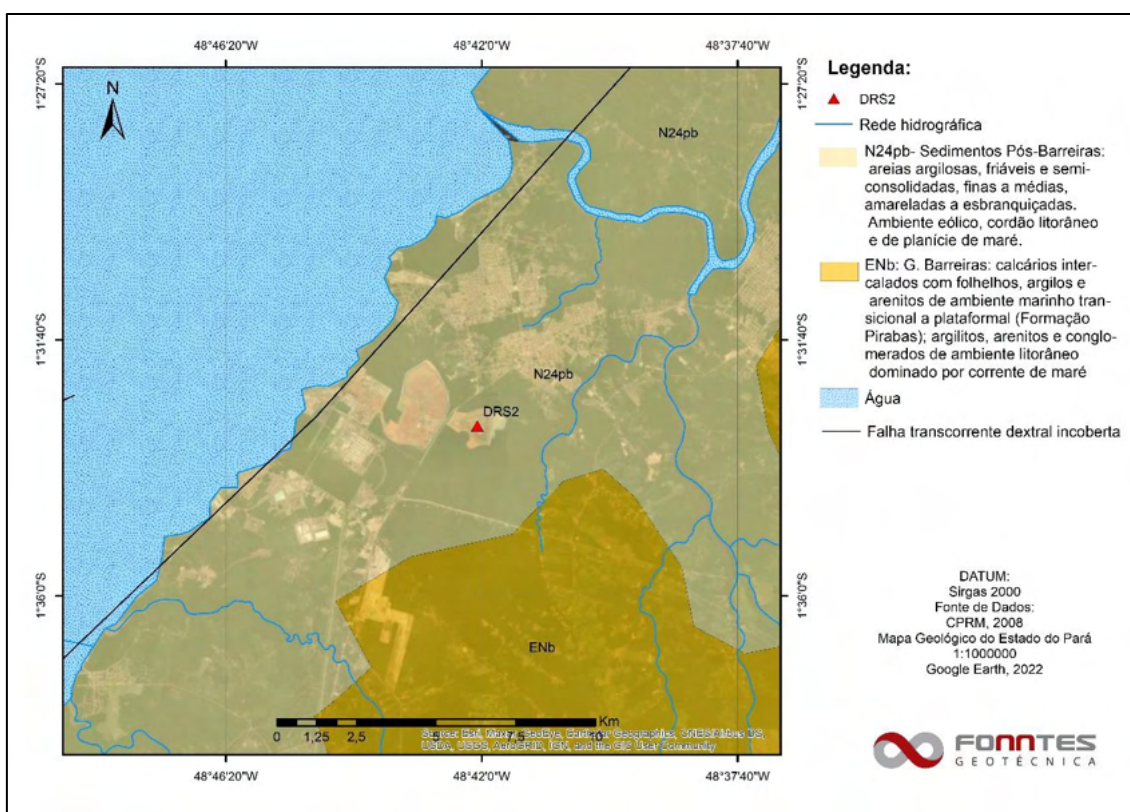


Figura 5.5 – Mapa geológico regional da estrutura DRS2

O relatório “As Is” RT-3540-54-G-1014 desenvolvido pela Pimenta de Ávila, apresenta as estruturas DRS1 e DRS2 inseridas sobre domínios da Formação/Grupo Barreiras,

enquanto a Figura 5.5 indica que as duas estruturas estão inseridas sobre Sedimentos Pós-Barreiras. Levando em consideração o caráter regional do estudo, é natural que haja diferenças entre os estudos, devido principalmente a escala de 1:1.000.000 (Figura 5.5), não sendo essas consideradas inconsistências.

5.2.2 Histórico de Investigações

Com base no estudo detalhado elaborado pela Pimenta de Ávila (RT-3541-54-G-095), a Tabela 5.1 apresenta uma síntese das investigações executadas na área de estudo.

Tabela 5.1 – Tabela resumo do histórico de investigação executada na área da estrutura DRS2

CAMPANHA	EMPRESA	ANO	DOCUMENTO
Estudos conceituais e de pré viabilidade do sistema de rejeitos	-	2002	desenhos AN-306-DS-8875 a 8882
Estudos de condição de fundação	-	2011	RT-3540-54-G-366-R01
Projeto Detalhado do Desvio da PA-481	Solotécnica Engenharia	2014	Relatório AN-681-RL-38211 e desenhos AN-681-DS-38176 a 38181
Condições de fundação do traçado do <i>pipe conveyor</i>	Sondacil	2014	Anexo 3 do relatório (RT-3541-54-G-095), fornecido pela empresa Hatch

De acordo com a empresa Norsk Hydro, não houve premissas que justificassem a necessidade de execução de sondagens complementares na área próxima à estrutura DRS2, além das executadas para fomentar a execução do projeto.

É de conhecimento que a área de implantação não pode ser perfurada, uma vez que a estrutura é protegida por geomembrana e caso haja necessidade, as investigações deverão ser locadas próximo ao DRS2 em um contexto estratigráfico e geomorfológico semelhante. As investigações geológico-geotécnicas podem ocorrer durante toda a vida

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DO PROJETO EXECUTIVO DO DRS2		

útil de uma estrutura, partindo de premissas tais como: necessidade de reavaliação da estratigrafia da fundação e/ou modificações no projeto.

5.2.3 Geologia Local

Nesse subitem é apresentada uma síntese do estudo de geologia local desenvolvido no relatório “As Built” RT-3541-54-G-095 elaborado pela empresa Pimenta de Ávila.

A fundação da estrutura DRS2 pode ser dividida em 3 horizontes distintos, sendo eles: horizonte superior, horizonte intermediário e horizonte inferior.

O horizonte superior é caracterizado por siltes arenosos de coloração variada, e pode ser dividida em subhorizontes superior e inferior, sendo o primeiro constituído por siltes arenosos de compactidade fofa e NSPT menores que 5 golpes. O subhorizonte inferior apresenta características semelhantes ao superior (compactidade fofa e coloração amarelada), porém com valores de NSPT variando entre pouco a medianamente compacto, variando entre 5 a 16 golpes.

O horizonte intermediário é constituído por camada arenosa de coloração variada e NSPT com grande variação, desde 10 golpes até o impenetrável (areias mais finas). Apresenta granulometria variando de fina a grossa e camada com espessura de 5 a 18 metros.

Sotoposto ao horizonte intermediário, encontra-se o horizonte inferior, que se caracteriza por apresentar textura silto-arenosa a areno siltosa, coloração vareigada e compactidade rija a dura (NSPT variando entre 47 a 60 golpes).

A Figura 5.6 apresenta a seção típica da área de estudo.

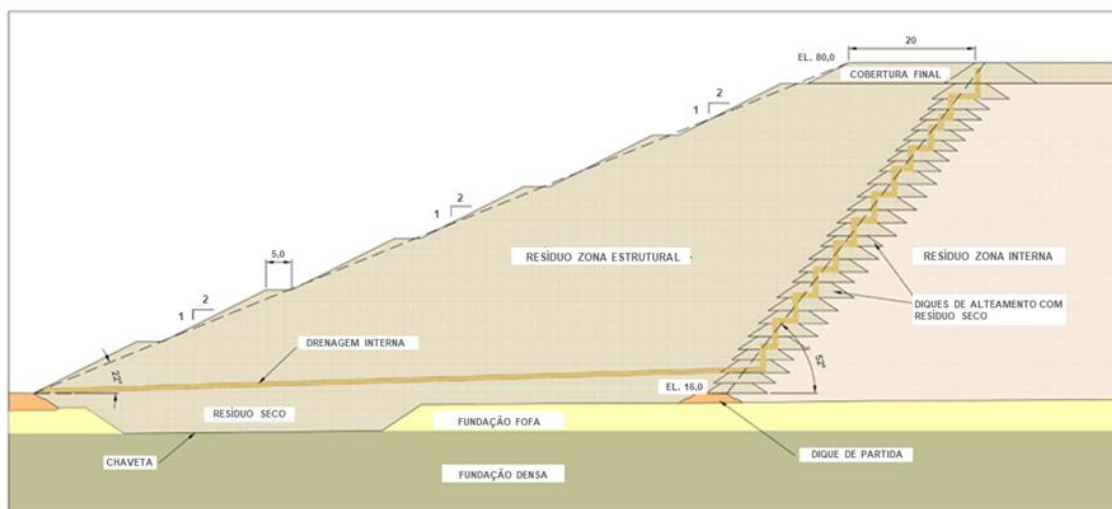


Figura 5.6 – Seção transversal típica do DRS2 (Fonte: RT-469137-54-G-0002)

5.3 Plataforma da Pilha de Retomada do Resíduo e Célula de Contingência

A plataforma da pilha de retomada de resíduo para disposição no DRS2 foi projetada na El. 16,0 m, com área em planta de cerca de 49.900 m².

A Célula de Contingência foi projetada para receber resíduo em condições de umidade extremamente elevadas. Tendo em vista que elevada umidade impossibilitaria a sua disposição por meio de espalhamento com trator de esteiras. Foi prevista crista na El. 16,0 m e fundo com elevação variável em torno da EL. 11,0 m, área em planta de cerca de 48.500 m², taludes de montante com inclinação 1V:1,5H e volume de armazenamento de aproximadamente 199.483 m³ de resíduo “super úmido”. A Célula de Contingência é apresentada na Figura 5.7.



Figura 5.7 – Célula de Contingência

5.4 Canais de Contorno e Bacias de Controle (BC 201 e BC 202)

O sistema de proteção e condução das águas pluviais do DRS2 é formado por dois canais de contorno associados a duas bacias de controle denominadas BC 201 e BC 202.

Conforme memorial descritivo (MD-3541-54-G-096), em função dos estudos hidrogeológicos obtidos da área, foi definido que a cota de escavação do fundo das Bacias de Controle (BC 201 e BC 202) seria na El. 9,0 m.

O canal implantado adjacente ao reservatório de resíduos, denominado canal de contenção de sedimentos, apresenta cerca de 15m de largura da base, taludes com inclinação de 1V:1,5H, e fundo na elevação 11,0m (Figura 5.8). Tem como objetivo

conter os sedimentos provenientes da drenagem da pilha, que porventura sejam carreados para o canal.



Figura 5.8 – Canal de contorno adjacente ao DRS2

O segundo canal (canal de adução das bacias), adjacente ao canal de contenção de sedimentos, possui cerca de 3m de largura de base, taludes com inclinação de 1V:1,5H, e fundo na elevação 10,5m. Contorna toda a área do depósito e tem como objetivo receber os efluentes a partir do canal de contenção de sedimentos e conduzi-los até as bacias de controle BC 201 e BC 202, de onde o efluente é bombeado para a estação de tratamento.

O controle do fluxo de efluente do depósito para os canais e bacias é feito através de extravasores distribuídos ao longo dos diques de contorno.

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DO PROJETO EXECUTIVO DO DRS2		

A bacia de controle BC 201 tem uma área de cerca de 34.585 m² de fundo, taludes 1V:1,5H, crista na elevação 15,50 m e fundo na elevação 9,00 m. Possui um volume total de 258.129 m³. Já a BC 202 tem uma área de cerca de 65.301 m² de fundo, taludes 1V:1,5H, crista na elevação 15,50 m e fundo na elevação 9,00 m, perfazendo um volume total de 463.201 m³.

A partir das bacias de controle o efluente é bombeado para a estação de tratamento.

5.5 Dique de Contorno

O dique de contorno do reservatório é utilizado como acesso de operação. Apresenta borda interna da crista na El. 16,0 m, largura da crista de 13,0 m, com inclinação para as duas laterais.

5.6 Dique entre canal de contenção de sedimentos e canal de adução das bacias de controle

O dique entre canal de contenção de sedimentos e canal de adução das bacias de controle possui crista na El. 16,0, com 5,8 m de largura e inclinação para dentro do canal de contenção de sedimentos. Taludes de montante e jusante com inclinação de 1V:1,5H. Apresenta revestimento de laterita na crista.

5.7 Dique externo do canal de adução das bacias de controle

O dique externo do canal de adução das bacias de controle possui crista na El. 15,5, com 7,8 m de largura e inclinação para dentro do canal. Taludes de montante e jusante com inclinação de 1V:1,5H. Apresenta revestimento de laterita na crista. A Figura 5.9 indica a localização de cada um dos diques supracitados.



Figura 5.9 – Identificação do dique externo, dique entre canal de adução e canal de contenção de sedimentos e dique de contorno e acesso de operação.

5.8 Dique externo das bacias de controle (BC 201 e BC 202)

O dique externo das bacias de controle possui crista na El. 15,5, com 5,8 m de largura e inclinação para dentro das bacias. Taludes de montante e jusante com inclinação de 1V:1,5H.

5.9 Dique de Contenção da Área Úmida

O dique de contenção da área úmida apresenta crista na EL. 16,0 m, com 5,9 m de largura e extensão de cerca de 2.038,37 m. Possui revestimento de laterita na crista, bem como 6 aberturas com 3m de largura na base que servem de extravasores.

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DO PROJETO EXECUTIVO DO DRS2		

5.10 Dique Central e Fingers

Foram projetados dique central e fingers dentro da área destinada à disposição de resíduo úmido, para possibilitar o acesso de caminhões que levarão o resíduo a ser disposto nesta área. Os Fingers foram implantados nos bordos direito e esquerdo do dique central, sendo nomeados 1D e 1E e 2D e 2E. Na ponta dos fingers e em alguns pontos do dique central foram previstas áreas circulares para manobra dos caminhões, posicionamento e lançamento do resíduo para dentro do reservatório. Nestas áreas circulares, foram previstas rampas para a descida de tratores de esteira que promovem o espalhamento do resíduo.

O dique central possui cota de crista variável entre as EL. 16,0m e EL. 20,21 m, com 15,4 m de largura e extensão de cerca de 620,0 m. Os fingers possuem cota de crista variável entre as ELs. 15,7m e EL. 19,8 m, com 15,4 m de largura e extensão total de cerca de 647,0 m. O revestimento na crista do dique central e fingers ficou a cargo da Hydro Alunorte e não é apresentado no memorial descritivo (MD-3541-54-G-096).

Durante a visita técnica, foi possível identificar a conformação inicial do Dique central e fingers (infraestrutura inicial do DRS2), estando apresentada na Figura 5.10.



Figura 5.10 – Dique central e fingers – infraestrutura inicial do DRS2

5.11 Sistema de Impermeabilização

O DRS2 conta com um sistema simples de barreira impermeabilizante, constituído por geomembrana PEAD com espessura de 1,5 mm, nos taludes de montante e fundo do reservatório, canais, bacias, plataforma da pilha de retomada e na crista dos diques de contorno e dique de contenção da área úmida.

Para proteção da geomembrana quanto ao puncionamento por qualquer material pontiagudo que possa existir nas áreas de aterro e de terreno natural que ela cobrirá, nos taludes foi instalado, sob a geomembrana, geotêxtil não tecido de gramatura igual a 400g/m² e, no fundo do reservatório, das bacias e do canal de contenção de sedimentos, a geomembrana estará sobre uma camada de 7,0 cm de areia.

AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DO PROJETO EXECUTIVO DO DRS2

Na crista do dique de contorno, que servirá de acesso ao reservatório do DRS2, onde haverá trânsito de veículos, como caminhões carregados de resíduo, foi aplicada geomembrana texturizada nas duas faces, que proporciona maior atrito na interface com o solo, e sobre ela uma camada de 1 m de solo sem pedregulhos, de forma a evitar que o tráfego promova danos à geomembrana. Sobre a camada de solo foi projetado a aplicação de asfalto. Durante a visita técnica esse último ainda não havia sido executado.

De acordo com o memorial descritivo, na crista do dique de contenção da área úmida a configuração é a mesma, exceto que a espessura da camada de solo sem pedregulhos sobre a impermeabilização seria de 0,75 m e logo acima uma camada de 0,25 m de espessura de laterita.

Na área da plataforma da pilha de retomada, também foi utilizada geomembrana texturizada nas duas faces, e sobre ela uma camada de 0,75 m de solo sem pedregulhos, com 0,25 m de laterita por cima, tendo sido delimitada pela Hydro Alunorte a área asfaltada.

Na área do reservatório do DRS2 onde será disposto o resíduo em período de estiagem também foi prevista a aplicação de geomembrana de 1,5 mm de espessura, texturizada nas duas faces.

Nos taludes de jusante do canal de contorno e bacias poderá ser aplicada geomembrana de 1,0 mm ou vegetação de grama em placa, a ser definido pela Hydro Alunorte.

5.12 Drenagem Interna da Pilha

Segundo o memorial descritivo, o sistema de drenagem interna foi previsto ser implantado quando a pilha de resíduo atingir a elevação 16 m, ou seja, a borda do dique

AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DO PROJETO EXECUTIVO DO DRS2

de contorno. Consiste em drenos transversais, espaçados de 10 m entre si, de seção retangular de 0,50 m por 0,50 m de brita 2, envolto por geotêxtil e uma camada de 0,15 m de areia média. A função dos drenos é conduzir o fluxo de água interno da pilha, da área úmida até a crista do dique de contorno da área seca, com declividade de 2%, evitando assim a saturação da zona estrutural da pilha. A água proveniente dos drenos é coletada pela canaleta do dique de contorno, de onde segue o fluxo de efluentes até as bacias de controle.

A Figura 5.11 e Figura 5.12 ilustram a seção e detalhe típicos dos drenos.

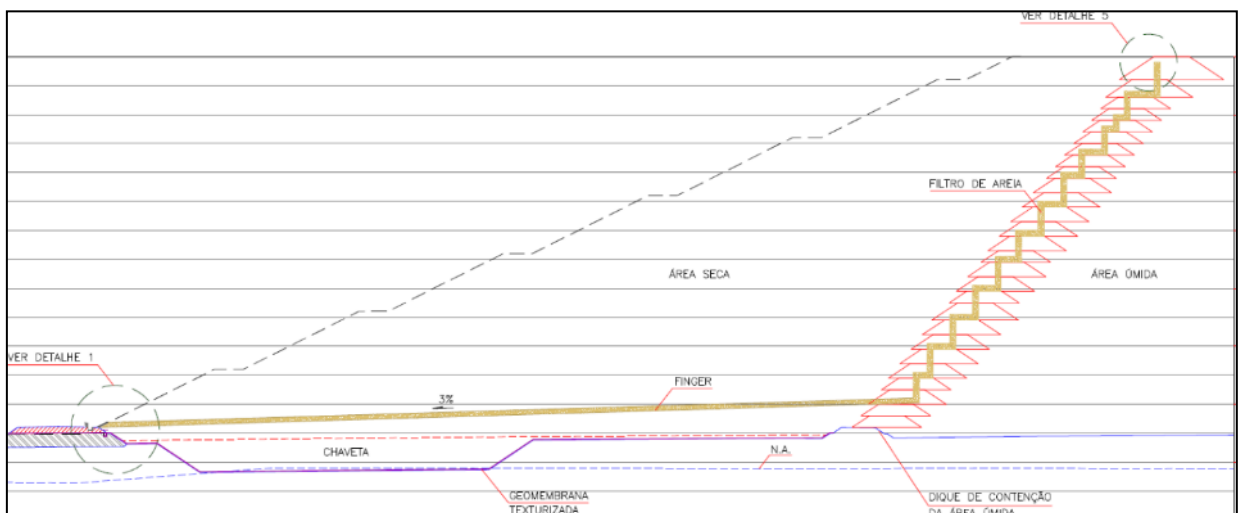


Figura 5.11 – Seção Típica – Drenagem interna da pilha (documento D1-3541-54-G-163)

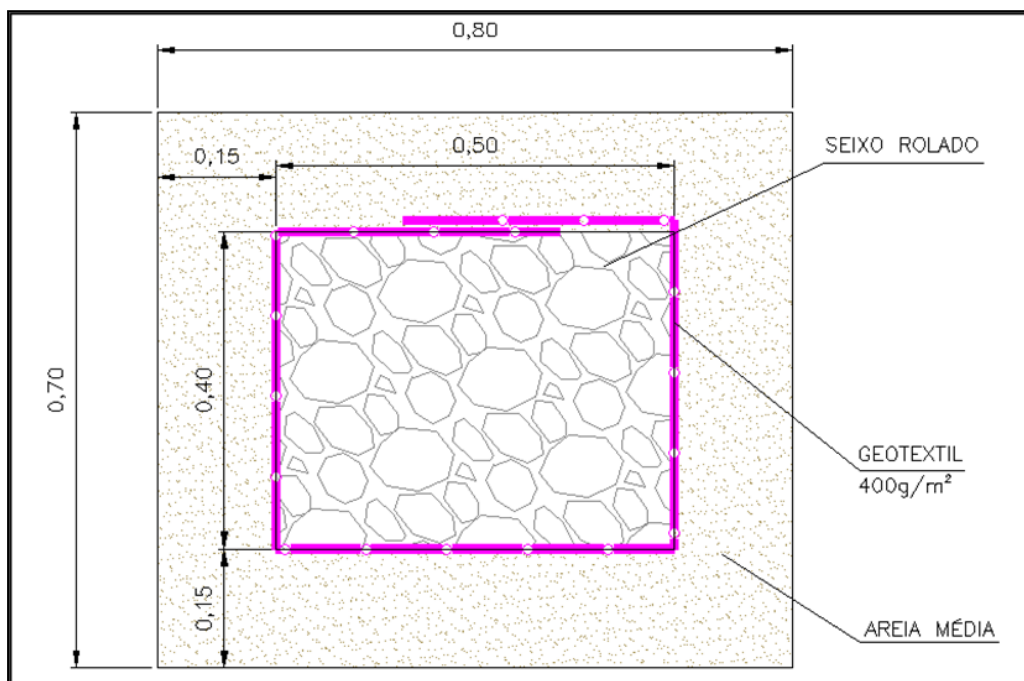


Figura 5.12 – Detalhe Típico – Drenos (D1-3541-54-G-163)

5.13 Instrumentação

Para permitir o monitoramento das condições geotécnicas da pilha de resíduo filtrado do DRS2, foi prevista a instalação de instrumentação geotécnica, a saber:

- 20 Inclinômetros: aplicável para medição de deslocamentos horizontais em profundidade;
- 07 Piezômetros Casagrande e 19 piezômetros elétricos de corda vibrante: medição da poropressão na fundação e no interior da pilha durante a construção da mesma;
- 10 Marcos superficiais: monitoramento dos deslocamentos horizontais e verticais na superfície.

5.14 Sistema Extravasor

O sistema de controle das águas no interior do DRS2, até a El. 16m (Fase 1) é desenvolvido de 2 maneiras distintas, a saber:

AValiação DA COMPATIBILIDADE DO PROJETO EXECUTIVO DO DRS2

1. Por meio de sistema de bombeamento – corresponde ao controle das águas no interior do DRS2 abaixo da El. 14,0 m (elevação da soleira dos extravasores), ou seja, no trecho em que não é possível o escoamento das águas do interior do depósito pelos extravasores para os canais/bacias;
2. Por meio de extravasores – corresponde ao controle das águas no interior do DRS2 entre a El. 14,0 m a 16,0 m.

No DRS2 - Fase 1, foram projetados 22 extravasores em concreto armado no dique de contorno, com soleira na El. 14,00 m (planta de locação dos extravasores: D1-3541-54-C-039).

Entre o canal de contenção de sedimentos e o canal de adução é prevista a implantação 4 extravasores tipo galeria, controlado por stop-logs

Entre o canal de adução e as bacias de controle foram previstos 2 extravasores tipo galeria, controlado por stop-logs, localizados nos seguintes pontos:

- Canal de adução ligando à BC 201;
- Canal de adução ligando à BC 202;

Para facilitar a operação dos stop logs nos extravasores (soleira El. 14,00 m), foram projetados pórticos com dispositivo de içamento a serem instalados em cada extravasor.

O controle do Nível de água na Célula de Contingência é feito por meio de bombeamento, abaixo da elevação 14 m, e por meio de extravasor em concreto dotado de stop logs entre as elevações 14 m e 16 m.

5.15 Galeria de Transposição do Canal de Adução

Na região da entrada para o DRS2 de acordo com descritivos documentos consultados, foi implantada uma galeria em concreto com dimensões internas de 3,0 x 4,0m para transposição do canal de adução.

5.16 Drenagem Superficial

Na concepção do sistema de drenagem superficial foram utilizadas canaletas retangulares em concreto, sendo designadas por CR (canaleta retangular), na área da plataforma, e por CRP (canaleta retangular periférica) no pé da pilha a ser construída.

A drenagem superficial periférica da pilha de resíduo desemboca nos extravasores (rápidos), enquanto a drenagem superficial da plataforma desemboca na Célula de Contingência ou no canal de adução, em função da localização do dispositivo de drenagem.

5.17 Projeto *as built*

O relatório As Built/Como Construído elaborado pela Pimenta de Ávila Consultoria LTDA (RT-3541-54-G-360 R01, revisão 01 de julho de 2018) foi elaborado após a implementação da primeira fase do DRS2 e apresenta pequenas divergências entre o projeto e o que foi executado. Ressalta-se que até o presente momento, apenas a primeira fase do DRS2 foi implementada. Segundo o relatório As Built (documento RT-3541-54-G-360 R01), não foram identificados documentos que evidenciem as seguintes ações durante a execução do projeto:

- Escavação e remoção de material fofo, nas áreas que posteriormente receberam o aterro dos diques;
- Escavação e remoção de material fofo, na região da chaveta.

AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DO PROJETO EXECUTIVO DO DRS2

- Ensaios de caracterização de resistência do concreto moldado in loco, e atualização de cotas, medidas, etc., das estruturas de concreto dos extravasores.
- Execução de camada de geotêxtil e tapete de areia sob a geomembrana.

Entretanto, no documento “considerações sobre o ‘Como Construído’ da infraestrutura inicial do DRS2- Fase 1” (RT-3541-54-G-451 R01), é informado que as mudanças do projeto foram ajustes de execução por decorrência de necessidades identificadas durante a implantação, concluindo que “As obras executadas para a construção da estrutura inicial de disposição do DRS2 – Fase 1 atendem às exigências e premissas estabelecidas em projeto, tornando o depósito apto para disposição de resíduos”.

6. METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO

No início dos trabalhos foram realizadas reuniões com o MP-PA com objetivo de alinhamento sobre o entendimento do escopo das letras do TAC 3.1. Um ofício foi elaborado pela FONNTES e direcionado ao MP-PA (protocolo PR-PA-00011706/2022 em 16 de março de 2022) com o entendimento da metodologia para resposta técnica de cada uma das letras do TAC 3.1. O “de acordo” ao entendimento foi encaminhado pelo MP-PA pelo Ilmo. Procurador da República Dr. Ricardo Augusto Negrini no dia 04 de abril de 2022. A metodologia estabelecida para o atendimento da letra N), objeto desse relatório, e reproduzida a seguir.

Esse é o item mais abrangente na auditoria. Corresponde a uma análise ampla do projeto do DRS2 em relação ao que de fato foi construído em campo. O presente relatório irá verificar e responder aos seguintes pontos para o depósito:

- *Será verificado se o(s) tratamento(s) de fundação foram projetados e executados adequadamente;*

AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DO PROJETO EXECUTIVO DO DRS2

- *Será verificado se o dimensionamento do sistema de impermeabilização (geomembrana de PEAD) foi realizado conforme critérios consagrados de engenharia. Nota: a verificação dos controles tecnológicos de construção (ensaios de campo e laboratório) será respondido no item O);*
- *Os Diques de Contorno serão verificados quando os critérios de projetos e boas práticas de engenharia do ponto de vista construtivo e estrutural;*
- *Será verificada a segurança da estrutura do ponto de vista da estabilidade física e estrutural, através de análise de estabilidade já disponíveis, realizados por outras empresas que auditaram as estruturas ao longo do tempo, considerando as resistências dos materiais dos Diques de Contorno e dos Resíduos sólidos armazenados. Na ausência de uma normatização específica no Brasil para esse tipo de estrutura, será verificada a experiência internacional e os resultados de estabilidade serão avaliados ao que recomenda as normas ABNT NBR 13.028 e ABNT NBR 13.029, naquilo que for aplicável, em relação aos critérios geotécnicos. Nota: Nessa resposta não serão conduzidas novas análises de estabilidade, o parecer será realizado através das análises já realizadas ao longo do tempo por outras empresas que auditaram as estruturas. No item I) está prevista uma verificação mais detalhada e exclusiva aos modelos computacionais elaborados para se calcular a estabilidade;*
- *Será verificado se a solução hidráulica para as águas superficiais são adequadas, conforme critérios consagrados de engenharia, para suportar eventos chuvosos extremos sem que ocorram transbordamentos. Esse aspecto necessitará também da verificação dos critérios operacionais, constante nos manuais de operação das bacias utilizadas para armazenamento e bombeamento das águas de chuva para estação de tratamento. A capacidade volumétrica das baias e a capacidade de bombeamento serão verificadas quanto sua adequação técnica. Na ausência de uma normatização específica no Brasil para esse tipo de estrutura, será verificada a*

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DO PROJETO EXECUTIVO DO DRS2		

experiência internacional e as normas ABNT NBR 13.028 e ABNT NBR 13.029, naquilo que for aplicável, em relação os critérios hidrológicos e hidráulicos;

7. DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO

7.1 Tratamento de fundação

Conforme indicado no Memorial descritivo do projeto detalhado do Depósito DRS2, elaborado pela PIMENTA DE AVILA em 17/09/2015, doc. MD-3541-54-G-096-R00, com base nos dados das sondagens e inspeções de campo, foi considerada no projeto a remoção de uma camada superficial mínima de 0,60 m de solo orgânico em toda a área da projeção da Fase 1 do DRS2 e de 0,40 m de solo fofo na projeção dos diques, podendo estas espessuras serem adaptadas em campo em função das características do maciço terroso de fundação.

O memorial descritivo acrescenta que na área próxima à PA-481 foi identificada a existência de um material de bota-fora depositado no local, sendo necessária à sua remoção total e direcionamento para uma área de bota fora.

Além da escavação do terreno da fundação, o documento MD-3541-54-G-096-R00 indica a necessidade de escavação de uma chaveta contornando toda a região do reservatório de resíduo seco. A chaveta teria cerca de 50 m de largura na base e profundidades variando entre 2 a 5 m, com taludes laterais de escavação com inclinação de 1V:1,5H. A Figura 7.1 apresenta a Seção da Estaca 1 do desenho D1-3541-54-G-250-R02 com indicação da escavação da chaveta.

AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DO PROJETO EXECUTIVO DO DRS2

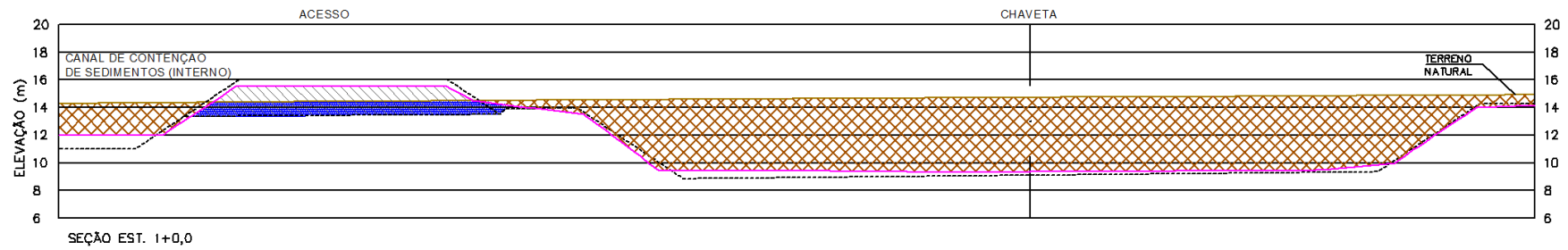


Figura 7.1 – Detalhe da escavação da chaveta contornando o DRS2 (PIMENTA DE AVILA, 2018)

AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DO PROJETO EXECUTIVO DO DRS2

De acordo com o Relatório técnico “Como Construído” do Depósito DRS2, elaborado pela PIMENTA DE AVILA em 24/07/2018, doc. RT-3541-54-G-360-R01, foram realizadas escavações no terreno do DRS2 para se alcançar um material com características geotécnicas aceitáveis para assentamento do aterro compactado, conforme especificado no projeto. Além da escavação da chaveta, foram realizadas escavações para toda a área dos canais de contorno, bacias de controle e Célula de Contingência.

O Relatório das considerações sobre o “Como Construído” da infraestrutura inicial do DRS2 – Fase 1 (RT-3541-54-G-45) indica que o preparo da fundação abrangeu escavação do terreno da fundação, removendo materiais inadequados conforme exigências do projeto. O desenho de terraplanagem da etapa de Como Construído “D1-3541-G-262-R03” evidencia a escavação realizada na região da chaveta. Todavia, conforme indicado nas notas do desenho supracitado, em algumas áreas não foi possível evidenciar a escavação prevista em projeto.

O Relatório “Como Construído” acrescenta que antes do lançamento da primeira camada de aterro foi realizada a preparação das fundações, abrangendo: escarificação; ajuste de umidade, quando necessário; e compactação a no mínimo 98% do grau de compactação Proctor Normal. A avaliação do controle de compactação é realizada por meio do método de Hilf.

Conforme indicado no Relatório “Como Construído”, o controle tecnológico da compactação e liberação das camadas considerou o método de Hilf. Durante a preparação da fundação, foram realizados 68 ensaios, obtendo-se a média do grau de compactação de 100,4%, com desvio padrão de 1,4%, e a média do desvio de umidade de 2,50%, com desvio padrão de 0,40%. A Figura 7.2 e a Figura 7.3 apresentam os histogramas de frequência do grau de compactação e do desvio de umidade, respectivamente.

AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DO PROJETO EXECUTIVO DO DRS2

Desta forma, com base no Relatório “Como Construído”, especificamente na Figura 7.2, a FONNTES verificou que foi realizada a preparação da fundação antes do lançamento da primeira camada de aterro e foi respeitado o critério de grau de compactação mínimo de 98% do Proctor Normal.

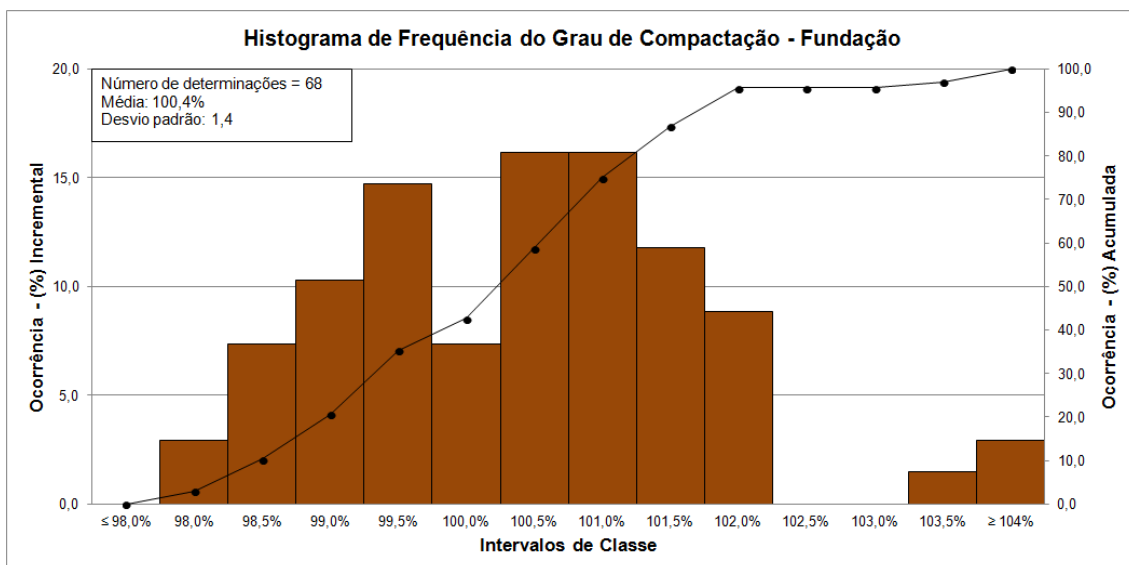


Figura 7.2 – Histograma de frequência do grau de compactação – Fundação (PIMENTA DE AVILA, 2018)

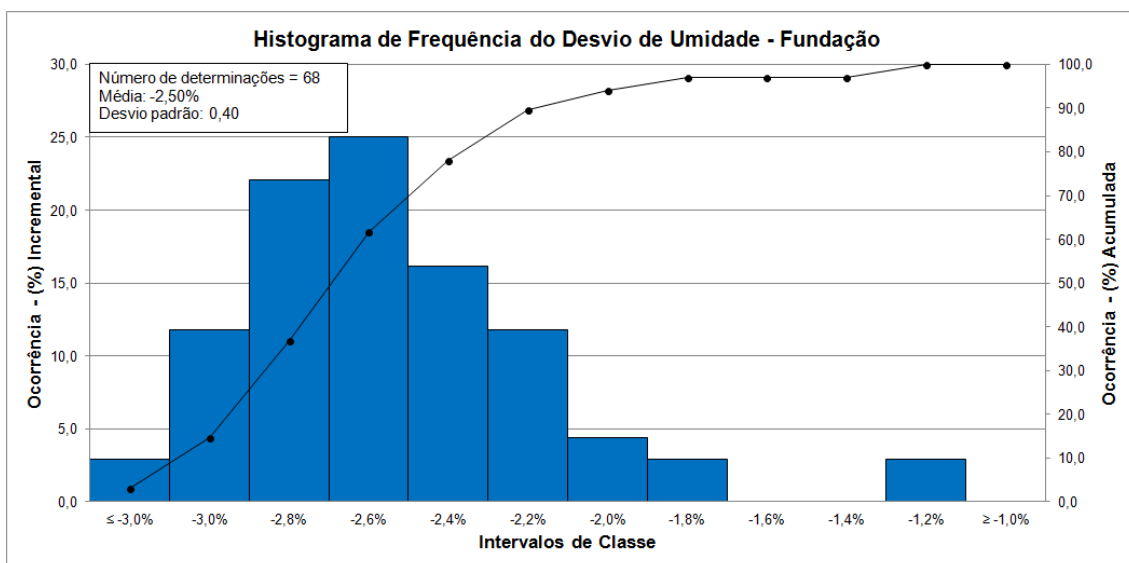


Figura 7.3 – Histograma de frequência do desvio de umidade – Fundação (PIMENTA DE AVILA, 2018)

7.2 Sistema de impermeabilização

A avaliação do sistema de impermeabilização do DRS2 foi abordada nas letras “N” e “O” da TAC 3.1. Portanto, neste item serão apresentados, de forma sucinta, as diretrizes estabelecidas em projeto e os estudos desenvolvidos nos demais relatórios, bem como suas principais conclusões.

7.2.1 Diretrizes estabelecidas em projeto

Conforme indicado no item 4.11, o DRS2 conta com um sistema simples de barreira impermeabilizante, constituído por geomembrana PEAD com espessura de 1,5 mm, nos taludes de montante e fundo do reservatório, canais, bacias, plataforma da pilha de retomada e na crista dos diques de contorno e dique de contenção da área úmida.

Na área do reservatório do DRS2 onde o resíduo é disposto em período de estiagem foi prevista a aplicação de geomembrana de 1,5 mm de espessura, texturizada nas duas faces. Nos taludes de jusante do canal de contorno e bacias pode ser aplicada geomembrana de 1,0 mm ou vegetação de grama em placa.

7.2.2 Interpretação de testes relativos à aplicação de materiais sobre a geomembrana

O documento FG-2201-NHB-A-BA-RT22-00, emitido pela FONNTES em 17/03/2023, avaliou a escolha da geomembrana para o DRS2 levando em consideração a interação da mesma com o solo de cobertura, ou seja, se foi considerado para essa escolha o ângulo de atrito entre o solo e a geomembrana e se para tanto foram necessários ensaios com o material. Além disso, o documento avaliou e verificou se foram considerados de forma adequada para escolha do modelo a espessura das geomembranas, assim como na determinação dos seus critérios de instalação, como comprimento de soldas e valas de ancoragem.

AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DO PROJETO EXECUTIVO DO DRS2

O documento apresenta inicialmente as características físicas dos materiais geossintéticos envolvido na solução de projeto e posteriormente foi realizado um cálculo a partir dos dados de projetos e da metodologia proposta por VETERMATTI (2015), disponível no “Manual Brasileiro de Geossintéticos” para avaliação dos materiais projetados para impermeabilização.

Conforme apresentado no item 5.11, o DRS2 conta com um sistema simples de barreira impermeabilizante, constituído por geomembrana PEAD lisa e texturizada, com espessura variando entre 1,5 mm e 1,0 mm. A seguir é apresentado cada área do depósito em que cada geomembrana é aplicada:

- Geomembrana PEAD espessura 1,5 mm lisa – nos trechos os quais estarão em contato com o resíduo, quais sejam, taludes de montante e fundo do reservatório;
- Geomembrana PEAD espessura 1,5 mm texturizada – nos trechos onde há tráfego de veículos, quais sejam, a crista do dique de contorno, locais para disposição de resíduo durante o período de estiagem e plataforma de retomada de resíduo;
- Geomembrana PEAD espessura 1,0 mm lisa – nos trechos onde não há tráfego de veículos e/ou contato com os resíduos, qual seja, nos taludes de jusante do canal de contorno e das bacias.

As especificações técnicas de cada uma das geomembranas e geotêxtil supracitados são apresentadas no relatório de Especificação técnica de recebimento, aceitação e instalação da geomembrana do DRS2 (doc. ES-3541-54-G-100 R02).

De acordo com o documento FG-2201-NHB-A-BA-RT22-00, emitido pela FONNTES em 10/06/2022, após verificação das propriedades da geomembrana e geotêxtil utilizados, foi possível realizar uma avaliação de sua adequabilidade. Para tanto, foram utilizados os parâmetros disponíveis no projeto e aplicada a metodologia de dimensionamento

AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DO PROJETO EXECUTIVO DO DRS2

proposta por VERTERMATTI (2015) para avaliação dos materiais geossintéticos propostos no projeto.

Após a análise, conclui-se que foi adotado valor de espessura da geomembrana adequado sob os resíduos para atender aos esforços que o DRS2 irá exercer ao final de sua implantação (1,5 mm de espessura). Além disso, também foi identificado que a gramatura do geotêxtil de proteção ao puncionamento está dimensionada de forma conservadora e a vala de ancoragem da geomembrana também estão adequados.

As geomembranas projetadas com 1,0 mm de espessura, recomendadas apenas para proteção de taludes possuem carregamento desprezível em relação a resistência do material geossintético e dispensam verificação. Foi sugerido a menor espessura disponível pelo fabricante ou substituição por grama em placa, por serem regiões sem contato com os resíduos.

As demais verificações conduzidas nesse estudo resultaram em um dimensionamento similar aquele calculado no projeto do Depósito DRS2.

7.2.3 Interpretação dos ensaios para verificação da estanqueidade da geomembrana

No documento FG-2201-NHB-A-BA-RT12, emitido pela FONNTES em 10/02/23, foram avaliados os documentos que atestaram a qualidade, integridade e estanqueidade da geomembrana durante a sua instalação no Depósito DRS2, assim como se foram aplicadas as melhores práticas de engenharia e executados os ensaios de controle conforme critérios consagrados e na frequência recomendada. Para tanto, foram consultados os seguintes documentos:

- Relatórios diários de obra (realizada entre novembro de 2015 e março de 2017);
- Registros de instalação de painel de geomembrana (realizado entre junho e dezembro de 2016);

AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DO PROJETO EXECUTIVO DO DRS2

- Registros de ensaio de spark test (realizado entre dezembro de 2016 e março de 2017);
- Registros de testes de pressurização (realizados entre dezembro de 2015 e janeiro de 2017);
- Registro de testes de vácuo (realizados entre fevereiro de 2016 e março de 2017);
- Registros de testes destrutivos com cunha (realizados entre dezembro de 2015 e março de 2017);
- Registros de testes destrutivos com extrusão (realizados entre janeiro e julho de 2016).

Também foram verificados se os ensaios de laboratório resultaram na rejeição de algum lote de geomembrana devido a suas características estarem incompatíveis com as recomendações de projeto, possivelmente relacionados a problemas fabris.

Os relatórios do diário de campo foram realizados entre os meses de novembro de 2015 e março de 2017. Os registros indicam que a fiscalização ocorreu por parte da empresa TDM Brasil e a instalação da geomembrana foi realizada pela empresa RECORD.

Os registros de instalação de painel de geomembrana apresentam a data de lançamento, localização da instalação, comprimento e largura de cada painel. Essa atividade ocorreu entre os meses de junho e dezembro de 2016.

Os testes de pressurização para a geomembrana do DRS2 foram realizados entre dezembro de 2015 e janeiro de 2017. Os registros apresentam a data de realização do teste, o manômetro utilizado, o número dos painéis de geomembrana cuja solda foi analisada, a hora inicial e final do teste, as pressões iniciais e finais do teste e se ele foi aprovado ou não, além de observações quando pertinentes.

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DO PROJETO EXECUTIVO DO DRS2		

Os testes de vácuo para a geomembrana do DRS2 foram realizados entre fevereiro de 2016 e março de 2017. Os registros apresentam a data de realização do teste, o vacuômetro utilizado, o número dos painéis de geomembrana cuja solda foi analisada, o comprimento do trecho, o motivo de ter sido um trecho analisado pelo teste de vácuo, e se ele foi aprovado ou não, além de observações quando pertinentes.

Os testes destrutivos com cunha e extrusão para a geomembrana do DRS2 foram realizados entre dezembro de 2015 e março de 2017. Os registros apresentam a data de realização do teste, o tensiômetro utilizado, o número dos painéis de geomembrana cuja solda foi analisada, o percentual de descolamento interno e externo, o percentual de cisalhamento, se ele foi aprovado ou não, além de observações quando pertinentes.

Conforme indicado no documento FG-2201-NHB-A-BA-RT12, após a análise dos registros disponíveis, foi possível concluir que os testes foram feitos sob supervisão constante, além de ter sido indicada cada anomalia ocorrida durante a atividade. Dessa forma, é possível afirmar que a aplicação e verificação da integridade, qualidade e estanqueidade da geomembrana ocorreu dentro dos padrões de engenharia esperados.

Por se tratar de uma estrutura mais recente o DRS2 possui um histórico bem completo. Entretanto, esse registro não dispensa o controle tecnológico operacional através da instrumentação. Os INA's, PZ's e especialmente os poços ambientais serão os responsáveis por atestar se de fato a geomembrana de PEAD instalada está cumprindo seu papel e garantindo a estanqueidade ao longo do tempo, para que os resíduos não tenham contato com as águas do meio ambiente. A avaliação da instrumentação de controle foi realizada na letra "D" desta TAC3.1 (doc. FG-2201-NHB-A-BA-RT08).

Com base no documento FG-2201-NHB-A-BA-RT08, em relação aos instrumentos de monitoramento do nível freático / piezométrico dos diques de controle, observa-se que, de modo geral, os piezômetros Casagrande instalados na crista do dique de contorno

AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DO PROJETO EXECUTIVO DO DRS2

com cota de fundo abaixo do nível d'água registrado nos poços de monitoramento adjacentes ao DRS2, apresentaram leituras sensíveis às precipitações, com oscilações em suas leituras similares aos poços de monitoramento. Tal tendência também foi observada nos piezômetros elétricos localizados no interior do DRS2, mas próximos ao dique de contorno.

Já os piezômetros elétricos das seções instalados mais a montante, e afastados do dique de contorno, possuem a cota de fundo mais elevada do que os piezômetros do dique de contorno. Com isso, esses instrumentos estão acima do nível d'água registrado nos poços de monitoramento e se mostram pouco sensíveis as precipitações (pois estão abaixo da geomembrana de impermeabilização, indicando leituras mais constantes, geralmente secos.

Além das sete seções instrumentadas do Depósito DRS2, existem duas seções localizadas nas Bacias BC-201 e BC-202. Verificou-se que em ambas as seções o nível d'água das Bacias BC-201 e BC-202 se encontram significativamente mais elevados do que os níveis piezométricos registrado nos piezômetros PZC-02 (cerca de 5,0 m) e PZC-04 (cerca de 9,0 m), respectivamente. Tendo em vista que o nível d'água se encontra mais elevado nas bacias do que no Dique de Contorno, é possível constatar que há boa performance em relação à estanqueidade da geomembrana PEAD que reveste as estruturas.

7.3 Controle construtivo dos Diques de contorno

Conforme indicado no Memorial descritivo do projeto detalhado do Depósito DRS2, elaborado pela PIMENTA DE AVILA em 17/09/2015, doc. MD-3541-54-G-096-R00, o dique de contorno do reservatório teria a borda interna da crista na El. 16,0 m, largura da crista de 13,0 m, com inclinação para as duas laterais, revestimento de asfalto na crista e seria utilizado como acesso de operação. Já o dique de contenção da área úmida teria crista na El. 16,0 m, com 5,9 m de largura, revestimento de laterita na crista.

AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DO PROJETO EXECUTIVO DO DRS2

O Relatório técnico “Como Construído” do Depósito DRS2, elaborado pela PIMENTA DE AVILA em 24/07/2018, doc. RT-3541-54-G-360-R01, descreve as avaliações dos desvios em relação à geometria das estruturas constituintes do depósito, comparando o que foi elaborado em projeto com o levantamento topográfico fornecido à empresa:

Dique de Contorno da Zona Interna:

- A crista do dique varia entre as El.15,5 m e El.16,1 m, com largura variando entre 5,9 m e 9,4 m. O projeto detalhado, entretanto, prevê cota da crista variando entre as El.16,0 m e 16,1 m. A ALUNORTE esclareceu que essa diferença de cotas se deu devido a execução pendente da pavimentação do acesso;
- O talude de montante apresenta declividades variando entre 1V/1,48H e 1V/3,50H, tendo sido especificado no projeto 1V/1,5H;
- O talude de jusante apresenta declividades variando entre 1V/1,55H e 1V/3,04H, tendo sido especificado no projeto 1V/1,5H;
- O recuo de 0,5 m de largura da borda do talude prevista no projeto para as estacas de 0 a 26 e de 62 a 100 não foi executada. A ALUNORTE esclareceu que durante a etapa de construção da pavimentação será empregado o recuo de 0,5 metros da borda do talude, conforme previsto em projeto.

Dique de Contorno da Zona Estrutural:

- A crista do dique varia entre as El.15,5 m e El.16,0 m, com largura variando entre 12,8 m e 28,5 m. O projeto detalhado, entretanto, prevê cota da crista variando entre as El.16,0 m e 16,2 m;
- O talude de montante apresenta declividades variando entre 1V/1,29H e 1V/2,47H, tendo sido especificado no projeto 1V/1,5H;
- O talude de jusante apresenta declividades variando entre 1V/0,89H e 1V/1,82H, tendo sido especificado no projeto 1V/1,5H;

AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DO PROJETO EXECUTIVO DO DRS2

A Especificação Técnica de Construção Projeto Detalhado do Depósito DRS2, elaborado pela PIMENTA DE AVILA em 17/08/2022, determina o controle de execução dos aterros compactados ao serem obedecidos:

- O maciço dos diques deverá ser compactado de modo a se obter um grau de compactação de 100% em relação ao Proctor Normal;
- A umidade do material deverá estar na faixa entre 1% acima e 2% abaixo da umidade ótima do Proctor Normal;
- A camada deve ter uma espessura de material solto de 0,20 m.

O documento acrescenta que as camadas que não atendem às especificações devem ser recusadas e recompactadas. Se após a recompactação a camada ainda não atender às condições requeridas, devem ser escarificadas, homogeneizada e recompactada, ou removida para fora.

O Relatório técnico “Como Construído” do Depósito DRS2, elaborado pela PIMENTA DE AVILA em 24/07/2018, doc. RT-3541-54-G-360-R01, apresenta o controle tecnológico de compactação e liberação das camadas utilizando o método de Hilf. O relatório apresenta os histogramas de frequência do grau de compactação e do desvio de umidade para 580 amostras ensaiadas relativas à execução do aterro, separadas por estruturas.

A seguir, apresenta-se um resumo dos resultados apresentados pela PIMENTA DE AVILA para cada estrutura:

- Acesso – em 91 ensaios realizados, a média do grau de compactação encontrado foi de 101,3%, com desvio padrão de 0,8, e para o desvio de umidade foram encontrados média e desvio padrão de 2,52% e 0,36, respectivamente;
- Célula de Contingência – em 5 ensaios realizados, a média do grau de compactação encontrado foi de 101,0%, com desvio padrão de 0,3, e para o desvio de umidade foram encontrados média e desvio padrão de 2,44% e 0,11, respectivamente;

AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DO PROJETO EXECUTIVO DO DRS2

- BC-201 – em 55 ensaios realizados, a média do grau de compactação encontrado foi de 101,3%, com desvio padrão de 1,1, e para o desvio de umidade foram encontrados média e desvio padrão de 2,23% e 0,65, respectivamente;
- BC-202 – em 54 ensaios realizados, a média do grau de compactação encontrado para a BC-202 foi de 101,3%, com desvio padrão de 0,8, e para o desvio de umidade foram encontrados média e desvio padrão de 2,56% e 0,26, respectivamente;
- Canal de controle externo – em 124 ensaios realizados, a média do grau de compactação encontrado para o Canal de Contorno Externo foi de 101,2%, com desvio padrão de 0,8, e para o desvio de umidade foram encontrados média e desvio padrão de 2,54% e 0,34, respectivamente;
- Canal de controle interno – em 129 ensaios realizados, a média do grau de compactação encontrado foi de 101,2%, com desvio padrão de 0,7, e para o desvio de umidade foram encontrados média e desvio padrão de 2,42% e 0,45, respectivamente;
- Dique central / Fingers – em 28 ensaios realizados, a média do grau de compactação encontrado foi de 101,2%, com desvio padrão de 0,5, e para o desvio de umidade foram encontrados média e desvio padrão de 2,51% e 0,22, respectivamente;
- Dique de contorno da área úmida – em 27 ensaios realizados, a média do grau de compactação encontrado foi de 101,4%, com desvio padrão de 0,4, e para o desvio de umidade foram encontrados média e desvio padrão de 2,51% e 0,23, respectivamente;
- Plataforma variável – em 67 ensaios realizados, a média do grau de compactação encontrado foi de 101,5%, com desvio padrão de 1,3%, e para o desvio de umidade foram encontrados média e desvio padrão de 2,60% e 0,30%, respectivamente.

AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DO PROJETO EXECUTIVO DO DRS2

A título de ilustração, a Figura 7.4 e a Figura 7.5 apresentam os histogramas de frequência do grau de compactação e desvio de umidade do canal de contorno externo, respectivamente, e a Figura 7.6 e a Figura 7.7 apresentam os histogramas de frequência do grau de compactação e desvio de umidade do dique de contorno da área úmida, respectivamente.

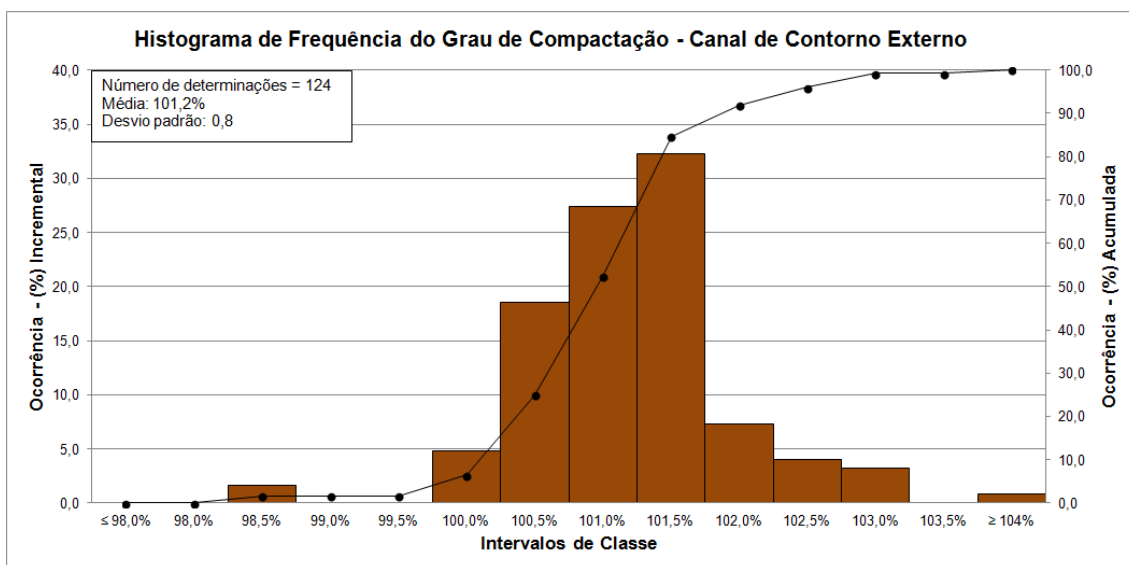


Figura 7.4 - Histograma de frequência do grau de compactação – Canal de Contorno Externo (PIMENTA DE AVILA, 2018)

AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DO PROJETO EXECUTIVO DO DRS2

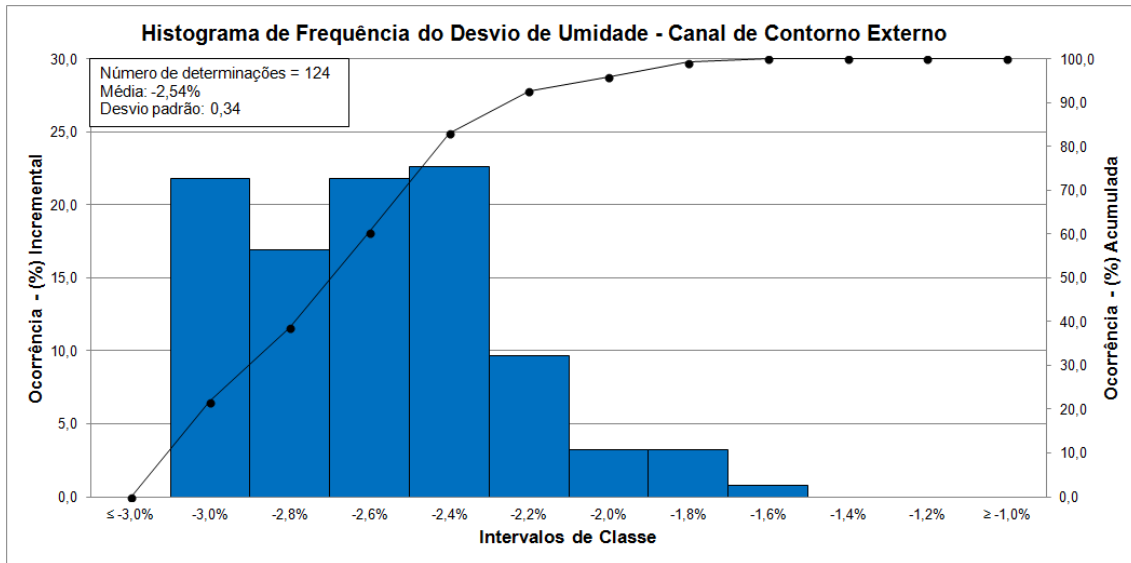


Figura 7.5 - Histograma de frequência do desvio de umidade – Canal de Contorno Externo (PIMENTA DE AVILA, 2018)

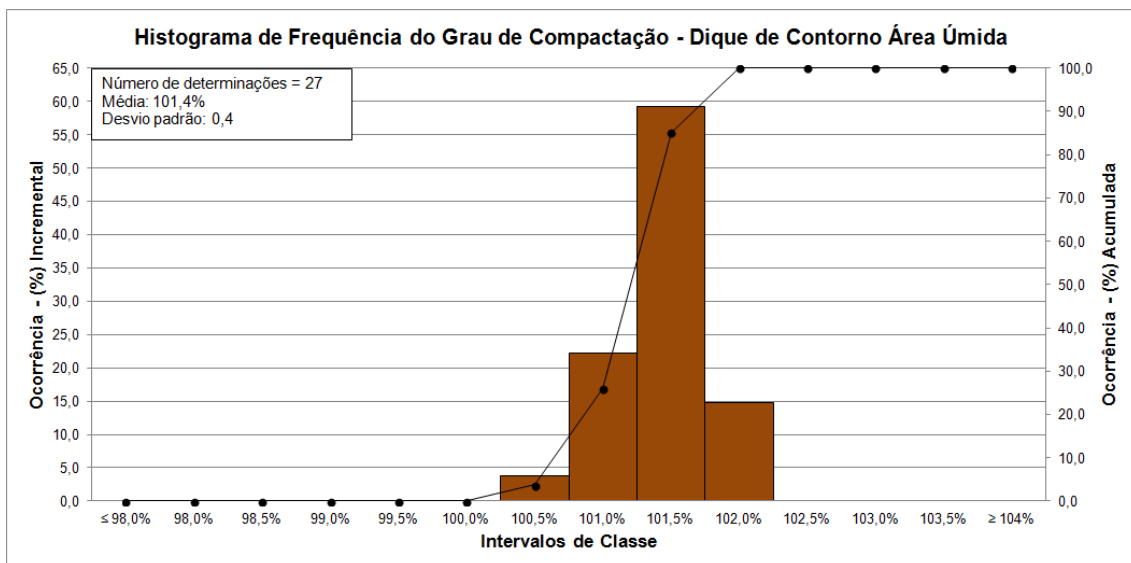


Figura 7.6 – Histograma de frequência do grau de compactação – Dique de Contorno Área Úmida (PIMENTA DE AVILA, 2018)

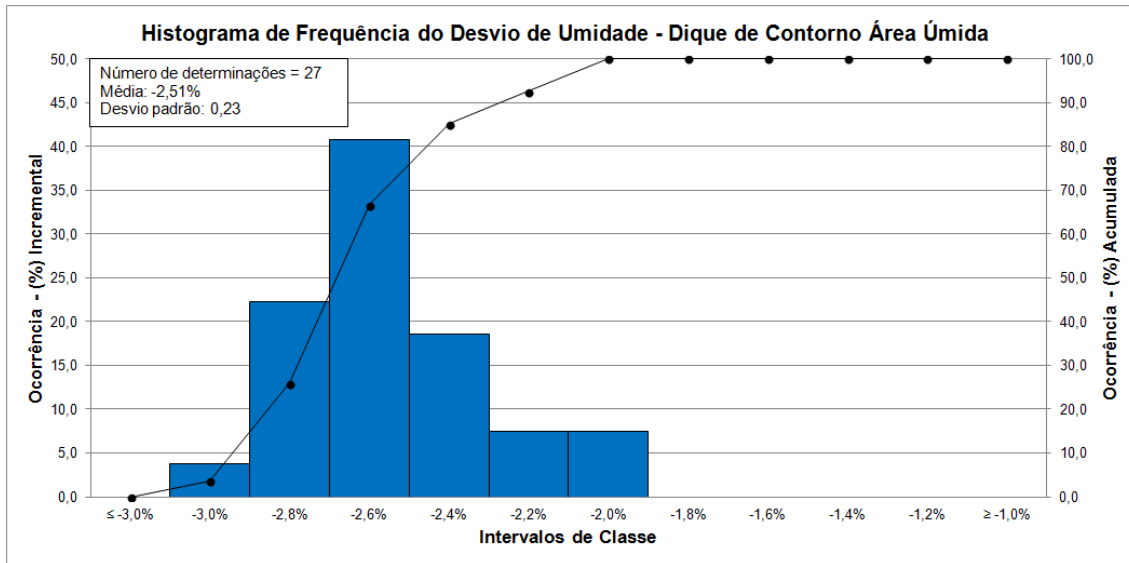
AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DO PROJETO EXECUTIVO DO DRS2


Figura 7.7 – Histograma de frequência do desvio de umidade – Dique de Contorno da Área Úmida (PIMENTA DE AVILA, 2018)

Com base na avaliação dos histogramas de frequência do grau de compactação, a FONNTES observa que o grau de compactação está em torno de 101,3% em relação ao Proctor Normal, apresentando média máxima de 101,5% para a plataforma variável. Portanto, a média dos graus de compactação em todas as estruturas de aterro compactado foram superiores ao 100% em relação ao Proctor Normal, indicado na Especificação Técnica de Construção Projeto Detalhado.

No caso da avaliação dos histogramas de frequência dos desvios de umidade, a FONNTES observa que os desvios de umidade estão em torno de 2,50% abaixo da umidade ótima. Portanto, abaixo do limite inferior de 2% abaixo da umidade ótima do Proctor Normal indicado na Especificação Técnica de Construção Projeto Detalhado. Isso não representa uma não conformidade, apenas uma possível necessidade de dar mais “passadas” com o rolo compactador para se atingir o grau de compactação de projeto. Provavelmente essa foi a ação em campo, pelo fato da especificação de compactação ter sido atendida em plenitude.

7.4 Estabilidade Física e Estrutural

A avaliação da estabilidade física e estrutura do Depósito DRS2 foi avaliada no documento FG-2201-NHB-A-BA-RT26, emitido pela FONNTES em 17/03/23. Neste documento, os estudos foram conduzidos considerando como referência as análises de estabilidade elaboradas no Relatório da Inspeção de Segurança Regular do DRS2, elaborado pela GEOCONSULTORIA em fevereiro de 2022, documento RT-469137-54-G-0002_rev03

Inicialmente, foram verificados os parâmetros de resistência ao cisalhamento adotados para os materiais, em conformidade com o banco de dados de ensaios e projeto anteriores. Posteriormente, foi verificada a geometria das seções de análise, utilizada na auditoria técnica, e verificação de possíveis alteração na estrutura a partir de uma base topográfica atualizada. Posteriormente, os modelos de análises foram recalculados pela FONNTES utilizando o software Slide2 da fabricante Rocscience e os resultados foram comparados com as referências normativas (Norma ABNT NBR 13.028/2017 e Norma ABNT NBR 13.029/2017).

A FONNTES realizou a Avaliação dos Parâmetros Geotécnicos do DRS2 no documento FG-2201-NHB-A-BA-RT20. Neste relatório foi realizada a avaliação exclusivamente do banco de dados de ensaios de laboratório, que são as medidas diretas e mais confiáveis para a resistência dos materiais, coesão e ângulo de atrito efetivo. Através do banco de dados foi realizada uma verificação para as principais campanhas de ensaios e os resultados obtidos. Comparativamente, foi verificado para cada material quais são os parâmetros médios calculados pela FONNTES no documento FG-2201-NHB-A-BA-RT20 e aqueles adotados no Relatório de Memória de Cálculo das Análises Geotécnicas, elaborado pela PIMENTA DE ÁVILA em 26/02/2018, doc. DB-3541-54-G-319-R1.

Como conclusão do documento FG-2201-NHB-A-BA-RT20, foi verificado que no geral, os valores médios calculados são maiores que aqueles adotados em projeto, o que pode

AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DO PROJETO EXECUTIVO DO DRS2

indicar que o projeto foi conservador. Entretanto, é importante lembrar que no projeto não foi necessariamente calculado um parâmetro médio em termos aritméticos, mas verificado um melhor ajuste para uma envoltória de ruptura considerando os pontos de máxima obliquidade das trajetórias de ruptura dos corpos de prova dos ensaios triaxiais, realizados para cada tipo de material. Esse é um método mais adequado para verificar uma envoltória de ruptura “média” e mais representativa para os materiais.

Avaliação similar a realizada pela projetista e apresentada no documento RT-3540-54-G-319-rev01 também foi elaborada no âmbito do documento FG-2201-NHB-A-BA-RT20 e resultados semelhantes foram obtidos. Portanto, não foram encontradas divergências entre os parâmetros adotados e os ensaios executados nos materiais das dependências do DRS2.

Os modelos geológico-geotécnicos foram realizados a partir de seções de controle, tradicionalmente utilizadas para essa verificação. As seções modeladas no último relatório de auditoria elaborado pela GEOCONSULTORIA foram comparadas com a geometria atualizada, obtida através da base topográfica do Depósito DRS2 atualizada em janeiro/2022 (Doc. D1-8600-54-L-2303-R0). Não foi necessária a revisão topográfica de nenhuma das seções da auditoria técnica, pois ainda estavam representativas em relação a situação de campo.

Em sequência os modelos geológico-geotécnicos das seções de avaliação foram recalculados com auxílio do software Slide 2. O modelo numérico foi construído com a hipótese de fluxo permanente com poropressões atribuídas por meio de uma superfície freática na fundação. Pelo fato do depósito estar em início de operação, os menores fatores de segurança estão localizados nos diques de contorno. Por esse fato, foi simulada a hipótese dos canais laterais com água e secos. De forma conservadora, a linha freática foi atribuída à fundação levando em consideração os registros máximos históricos dos piezômetros e medidores de nível d'água instalados no maciço, além dos

AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DO PROJETO EXECUTIVO DO DRS2

poços de monitoramento em proximidade das seções de referência, com exceção dos picos que, possivelmente, poderiam ser atribuídos à recarga superficial.

As análises de estabilidade foram realizadas em 3 (três) seções geológico-geotécnicas, representativas do DRS2, sendo estas as seções A, C e F. A Figura 7.8 apresenta a locação das seções de análises do DRS2. Essas seções foram selecionadas de acordo com as seções de controle que são tradicionalmente utilizadas para essa verificação do DRS2, conforme indicado no Relatório da Inspeção de Segurança Regular do DRS2, documento RT-469137-54-G-0002, elaborado pela GEOCONSULTORIA, em fevereiro de 2022. As seções de análises foram escolhidas de modo a representar todos os lados do depósito.

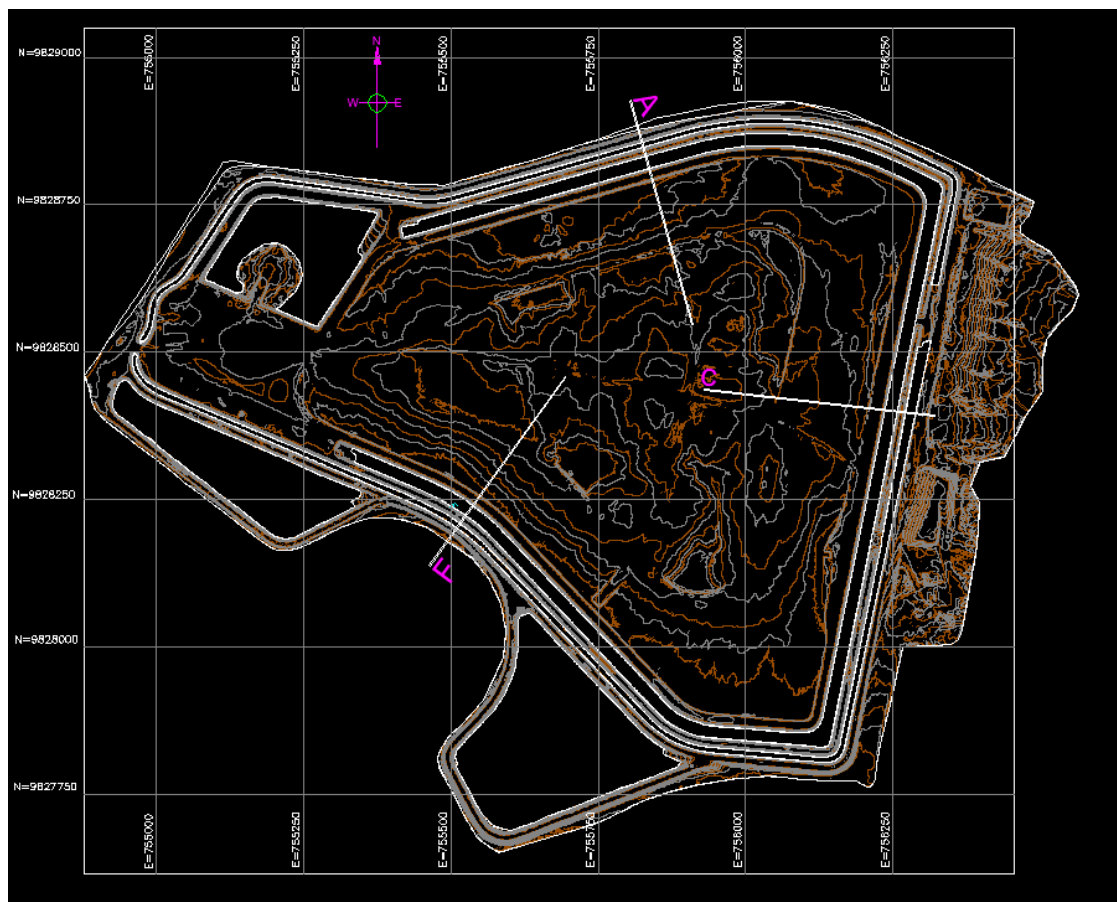


Figura 7.8 – Locação das seções transversais (adaptado do desenho D1-469137-54-G-0006-R00)

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DO PROJETO EXECUTIVO DO DRS2		

Os resultados das análises para condição atual estática, pseudoestática e não drenada da barragem do DRS2 ao longo das seções analisadas são apresentados no documento FG-2201-NHB-A-BA-RT26. Um resumo dos resultados obtidos nas análises de estabilidade é apresentado na Tabela 7.1, a seguir.

Tabela 7.1 – Resumo das análises de estabilidade do DRS2

CANAIS PERIFÉRICOS	SEÇÃO	FATOR DE SEGURANÇA OBTIDO		
		CONDIÇÃO ESTÁTICA	CONDIÇÃO PSEUDOESTÁTICA	CONDIÇÃO NÃO DRENADA DE PICO
Com lâmina de água	A-A	2,38	2,14	2,38
	C-C	2,26	2,03	2,26
	F-F	2,04	1,88	2,05
Sem lâmina de água	A-A	1,52	1,40	1,52
	C-C	1,51	1,39	1,51
	F-F	1,53	1,42	1,53

Os resultados foram comparados com àqueles obtidos no último relatório de auditoria (Doc. RT-469137-54-G-0002-rev03) e com a Norma ABNT NBR 13.028/2017. Deve-se destacar que para a condição não drenada a norma efetivamente não define o valor do fator, deixando a critério da projetista. No entanto, sugere-se o valor estabelecido na Resolução Nº. 95, de 07/02/2022, da Agência Nacional de Mineração (ANM), como boa prática de engenharia.

Conforme resultados apresentados na Tabela 7.2, as diferenças observadas entre os fatores de segurança não foram significativas. Essas diferenças podem estar relacionadas com o fato de a GEOCONSULTORIA apresentar os fatores de segurança com 1 (uma) casa decimal, enquanto a FONNTES apresentou com 2 (duas) casas decimais.

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DO PROJETO EXECUTIVO DO DRS2		

Tabela 7.2 – Comparação entre os fatores de segurança obtidos pela FONNTES e os obtidos na última auditorias elaborada pela GEOCONSULTORIA.

CANALIS PERIFÉRICOS	SEÇÃO	FATOR DE SEGURANÇA OBTIDO					
		CONDIÇÃO ESTÁTICA		CONDIÇÃO PSEUDOESTÁTICA		CONDIÇÃO NÃO DRENADA DE PICO	
		Fonntes (2022)	GEOCONSULTORIA (2022)	Fonntes (2022)	GEOCONSULTORIA (2022)	Fonntes (2022)	GEOCONSULTORIA (2022)
Com lâmina de água	A-A	2,38	2,40	2,14	2,20	2,38	2,40
	C-C	2,26	2,30	2,03	2,10	2,26	2,30
	F-F	2,04	2,00	1,88	1,90	2,05	2,00
Sem lâmina de água	A-A	1,52	1,50	1,40	1,40	1,52	1,50
	C-C	1,51	1,50	1,39	1,40	1,51	1,50
	F-F	1,53	1,60	1,42	1,50	1,53	1,60

A partir dos fatores de segurança obtidos, conforme resumo apresentado na Tabela 7.3, foi possível concluir que para todas as seções os cenários de simulação estudadas do DRS2 (condição estática, condição pseudoestática e condição não drenada de pico), foram obtidos fatores de segurança satisfatórios, ou seja, superiores aos recomendados pela Norma ABNT NBR 13.028/2017 e Resolução Nº 95, de 7 de fevereiro de 2022. Ressalta-se que a comparação com o que é exigido por essas legislações foi assumida aqui como boa prática de engenharia pelo auditor, uma vez que as estruturas da ALUNORTE são fiscalizadas pela SEMAS e não necessariamente devem seguir estas legislações.

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DO PROJETO EXECUTIVO DO DRS2		

Tabela 7.3 – Comparação entre os fatores de segurança obtidos para o DRS2 e os mínimos estipulados por norma.

CANAIS PERIFÉRICOS	SEÇÃO	FATOR DE SEGURANÇA OBTIDO		
		CONDIÇÃO ESTÁTICA FS mín = 1,50 ¹	CONDIÇÃO PSEUDOESTÁTICA FS mín = 1,10 ¹	CONDIÇÃO NÃO DRENADA DE PICO FS mín = 1,30 ²
Com lâmina de água	A-A	2,38	2,14	2,38
	C-C	2,26	2,03	2,26
	F-F	2,04	1,88	2,05
Sem lâmina de água	A-A	1,52	1,4	1,52
	C-C	1,51	1,39	1,51
	F-F	1,53	1,42	1,53

Nota 1: De acordo com a ABNT NBR 13.028/2017;

Nota 2: De acordo com Resolução Nº 95, de 7 de fevereiro de 2022.

7.5 Gestão de águas superficiais

Neste item será verificado se a solução hidráulica para as águas superficiais do DRS2 são adequadas, conforme critérios consagrados de engenharia, para suportar eventos chuvosos extremos sem que ocorram transbordamentos. Esse aspecto necessitará também da verificação dos critérios operacionais, constante nos manuais de operação das bacias utilizadas para armazenamento e bombeamento das águas de chuva para estação de tratamento. A capacidade volumétrica das baias e a capacidade de bombeamento serão verificadas quanto sua adequação técnica. Na ausência de uma normatização específica no Brasil para esse tipo de estrutura, será verificada a experiência internacional e as normas ABNT NBR 13.028/2017 e ABNT NBR 13.029/2017, naquilo que for aplicável, em relação os critérios hidrológicos e hidráulicos;

O projeto detalhado do DRS2 apresenta a memória de cálculo dos estudos hidrológicos e hidráulicos do DRS2 por meio do documento DB-3541-54-G-098 R01. O croqui indicando a localização das estruturas e gestão das águas superficiais é apresentado na Figura 7.9.

AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DO PROJETO EXECUTIVO DO DRS2

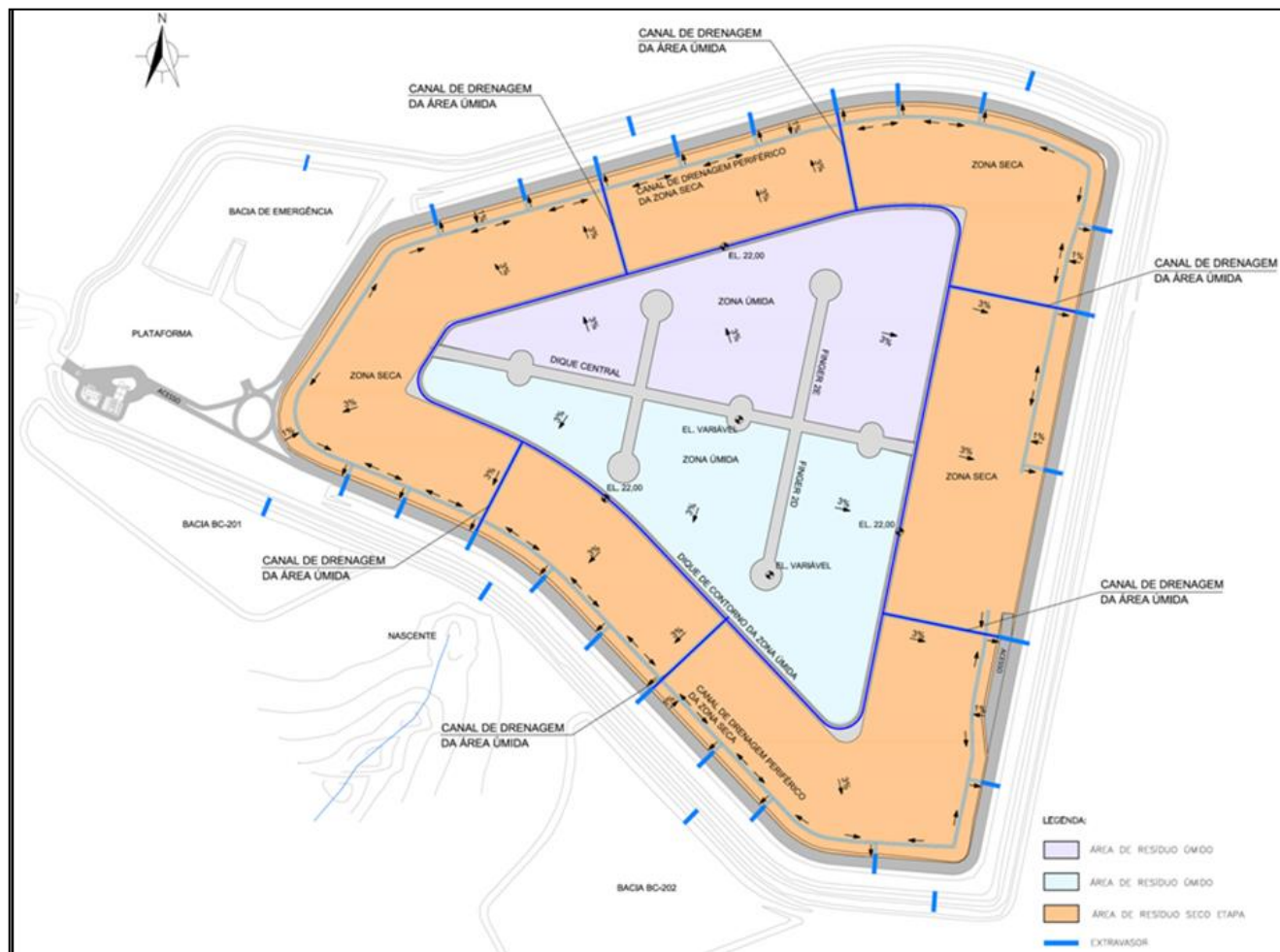


Figura 7.9 – Croqui do DRS2 (OM-3541-54-G-282 R08)

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DO PROJETO EXECUTIVO DO DRS2		

A análise de chuvas intensas dos estudos hidrológicos e hidráulicos do DRS2 foram atualizados pelo relatório “Atualização dos estudos de chuvas intensas”, elaborado pela GWS Engenharia em novembro de 2021 (RT-469133-54-G-003). Segundo este relatório a ALUNORTE definiu pela adoção da estação Vila do Conde como referência para os estudos de trânsito de cheias nos DRS1 e DRS2. Os quantis apresentados no relatório RT-469133-54-G-003 para a estação Vila do Conde são apresentados na Tabela 7.4.

AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DO PROJETO EXECUTIVO DO DRS2
Tabela 7.4 – Quantis pontuais de precipitação de projeto: Estação pluviométrica Vila do Conde

Duração	Tempo de Retorno (anos)										
	2	5	10	25	50	100	200	500	1.000	5.000	10.000
5 min	14,2	17,4	19,2	21,2	22,6	23,9	25,2	26,6	27,7	29,7	30,4
10 min	21,0	25,7	28,4	31,6	33,8	36,0	38,0	40,6	42,4	46,2	47,6
15 min	26,8	33,9	38,1	43,0	46,4	49,5	52,4	56,0	58,6	63,7	65,6
20 min	30,6	38,9	43,9	49,8	53,9	57,7	61,4	65,9	69,1	75,8	78,4
25 min	33,7	43,1	48,8	55,6	60,3	64,9	69,3	74,8	78,7	87,0	90,3
30 min	36,3	46,7	53,1	60,7	66,2	71,5	76,6	83,0	87,7	97,9	101,9
45 min	42,8	56,1	64,4	74,5	81,8	88,8	95,7	104,4	110,8	124,9	130,6
1 hora	47,9	63,9	74,2	86,8	96,0	104,9	113,5	124,7	132,9	151,4	159,0
1,5 horas	54,4	72,9	84,9	99,8	110,7	121,4	131,9	145,5	155,7	178,7	188,4
2 horas	59,2	79,7	93,2	110,1	122,5	134,8	146,9	162,8	174,8	202,3	214,0
3 horas	66,1	89,3	104,7	124,1	138,5	152,8	167,0	185,8	200,0	233,0	247,2
4 horas	71,3	96,6	113,5	135,1	151,2	167,2	183,3	204,7	221,0	259,0	275,6
6 horas	78,6	106,7	125,4	149,4	167,3	185,2	203,1	227,0	245,2	287,9	306,5
8 horas	84,1	114,2	134,4	160,2	179,6	198,9	218,4	244,3	264,0	310,5	330,8
10 horas	88,5	120,1	141,3	168,3	188,6	208,8	229,1	256,1	276,7	325,1	346,2
12 horas	92,3	125,2	147,2	175,2	196,2	217,1	238,1	266,0	287,3	337,2	358,8
14 horas	95,6	129,6	152,3	181,2	202,8	224,3	245,9	274,6	296,4	347,5	369,7
18 horas	101,3	137,2	161,0	191,3	213,8	236,3	258,7	288,5	311,0	363,7	386,5
24 horas	108,5	146,5	171,7	203,6	227,2	250,6	274,0	304,8	328,1	382,1	405,4
2 dias	122,0	161,7	187,4	219,3	242,7	265,9	289,1	319,8	343,4	399,2	423,8

AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DO PROJETO EXECUTIVO DO DRS2

Duração	Tempo de Retorno (anos)										
	2	5	10	25	50	100	200	500	1.000	5.000	10.000
3 dias	148,5	196,3	227,2	265,5	293,6	321,5	349,2	386,1	414,3	481,0	510,5
5 dias	191,4	251,5	290,1	337,8	372,7	407,2	441,5	487,0	521,7	603,7	639,8
7 dias	223,3	290,6	333,6	386,5	425,0	462,9	500,5	550,3	588,1	677,1	716,2
10 dias	271,8	351,5	402,2	464,2	509,3	553,6	597,4	655,3	699,2	802,3	847,5
15 dias	336,8	438,6	507,4	596,1	663,1	730,7	799,2	891,2	962,0	1130,7	1205,3
20 dias	393,0	502,4	574,8	666,3	734,2	801,6	868,8	957,3	1024,3	1179,7	1246,6
25 dias	444,9	564,9	639,9	731,0	796,6	860,6	923,7	1006,3	1068,7	1214,1	1277,3
30 dias	493,2	635,2	729,2	848,0	936,2	1023,6	1110,8	1225,8	1312,7	1514,4	1601,2
45 dias	637,7	825,5	949,9	1107,0	1223,6	1339,2	1454,5	1606,6	1721,5	1988,3	2103,1
60 dias	754,2	968,7	1110,7	1290,2	1423,3	1555,4	1687,1	1860,8	1992,1	2296,7	2427,9

7.5.1 Dimensionamento dos sistemas extravasores

A metodologia utilizada no dimensionamento dos sistemas extravasores do DRS2 consistiu na determinação das cheias de projeto com base nos quantis do estudo de chuvas existente, associadas a tempos de retorno estabelecidos em função do risco hidrológico do cronograma de implantação do Depósito. Para a distribuição dos quantis no tempo foi adotada a metodologia apresentada por Huff (1967).

Posteriormente ocorreu a simulação do trânsito de cheias nas estruturas de reservação estudadas, identificando o comportamento do reservatório para a condição de projeto. Em seguida é identificado o cenário mais crítico do trânsito de cheias, ou seja, o que provoca maior sobrelevação do nível d'água.

As vazões de projeto foram definidas fazendo uso do *software* HEC-HMS, versão 3.5, desenvolvido pelo *Hydrologic Engineering Center*, do Corpo de Engenheiros do Exército dos EUA (*U.S. Army Corps of Engineers*). A metodologia da obtenção das vazões de projeto é resumida a seguir:

- **Desagregação dos quantis de precipitação associados às durações e tempos de retorno adotados:** Método de Huff (1967), 2º quartil;
- **Transformação da chuva total em efetiva:** Método do NRCS – *Natural Resources Conservation Service*;
- **Transformação da chuva efetiva em escoamento superficial:** Método do hidrograma unitário do NRCS;
- **Propagação de vazão no reservatório:** Método de *Puls Modificado*.

7.5.1.1 Sistema extravasor da área úmida

O sistema extravasor da área úmida até o preenchimento de resíduos na cota EL. 14m é feita por meio de quatro extravasores/aberturas do dique de contenção da área úmida.

AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DO PROJETO EXECUTIVO DO DRS2

Estas seções de abertura apresentam seção trapezoidal, com 3 metros de largura de base e inclinação dos taludes de 1,5H:1,0V (Figura 7.10).

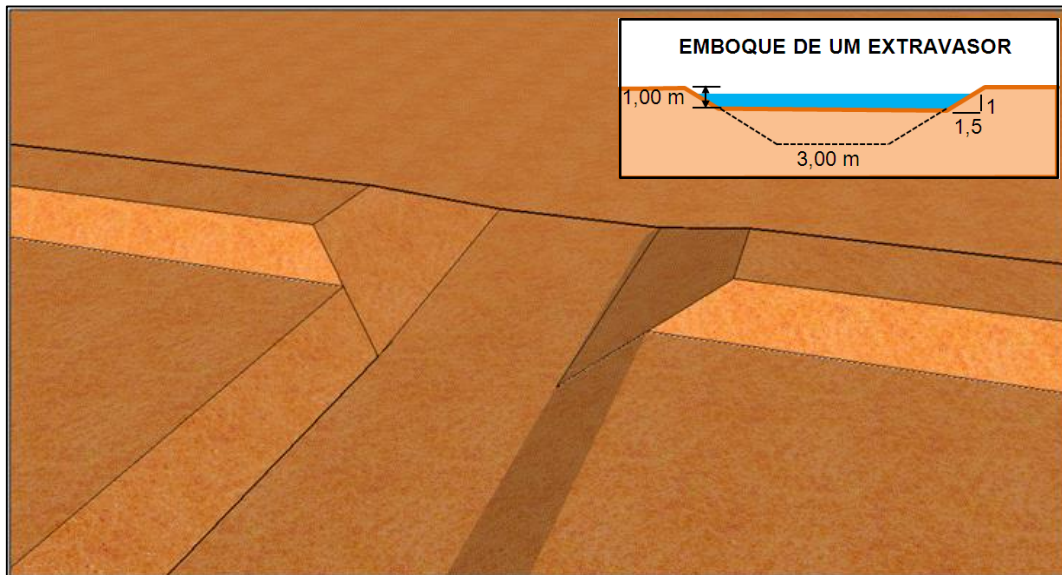


Figura 7.10 – Croqui de uma abertura do sistema extravasador da área úmida

Para o dimensionamento adotou-se o cenário considerando a crista do dique de contenção na El. 16,00m, com soleira do sistema extravasador em cotas variadas. E altura útil do extravasador para escoamento de 1,0m, a partir da El. 15,00m.

Os parâmetros físicos da bacia de contribuição são apresentados na Tabela 7.5. Como Chuva de Projeto, foram consideradas as diversas durações das precipitações associadas a 100 anos de tempo de retorno.

Tabela 7.5 – Principais parâmetros de modelagem hidrológica: área úmida (DB-3541-54-G-098)

Designação da bacia hidrográfica	Área de Drenagem (km ²)	CN	I_a (mm)	t_c (min)	lagtime (min)	Δt (min)	% A_{imp}
Área úmida	0,287	90	5,64	10,27	6,16	2	0,7%

Legenda:

AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DO PROJETO EXECUTIVO DO DRS2

CN – Número da Curva Índice; **I_a** – Abstração Inicial da Bacia de Contribuição; **t_c** – Tempo de Concentração; **lagtime** – Tempo de Retardo; **Δt** – Intervalo de Discretização dos hietogramas; **%Aimp** – Percentual da Área Impermeável da Bacia de Contribuição

Como resultados são apresentados a Tabela 7.6 e Figura 7.11, onde pode ser observado o resultado do trânsito de cheias simulados considerando já os quatro extravasores sobre a área úmida do depósito.

Tabela 7.6 – Resultados do Trânsito de Cheias – Sistema Extravador do Depósito de Resíduo

DRS2 – Área Úmida – TR = 100 anos	
Duração crítica da precipitação de projeto	1 h
Precipitação de projeto	76,8 mm
Elevação da crista do Dique	16,00 m
Elevação do Resíduo	15,00 m
Número de estruturas extravasoras	4
NA inicial	15,00 m
NA máximo maximorum	15,32 m
Borda livre remanescente	0,68 m
Vazão máxima afluyente	9,86 m ³ /s
Vazão máxima efluente	5,63 m ³ /s
Volume do hidrograma afluyente	14.690 m ³

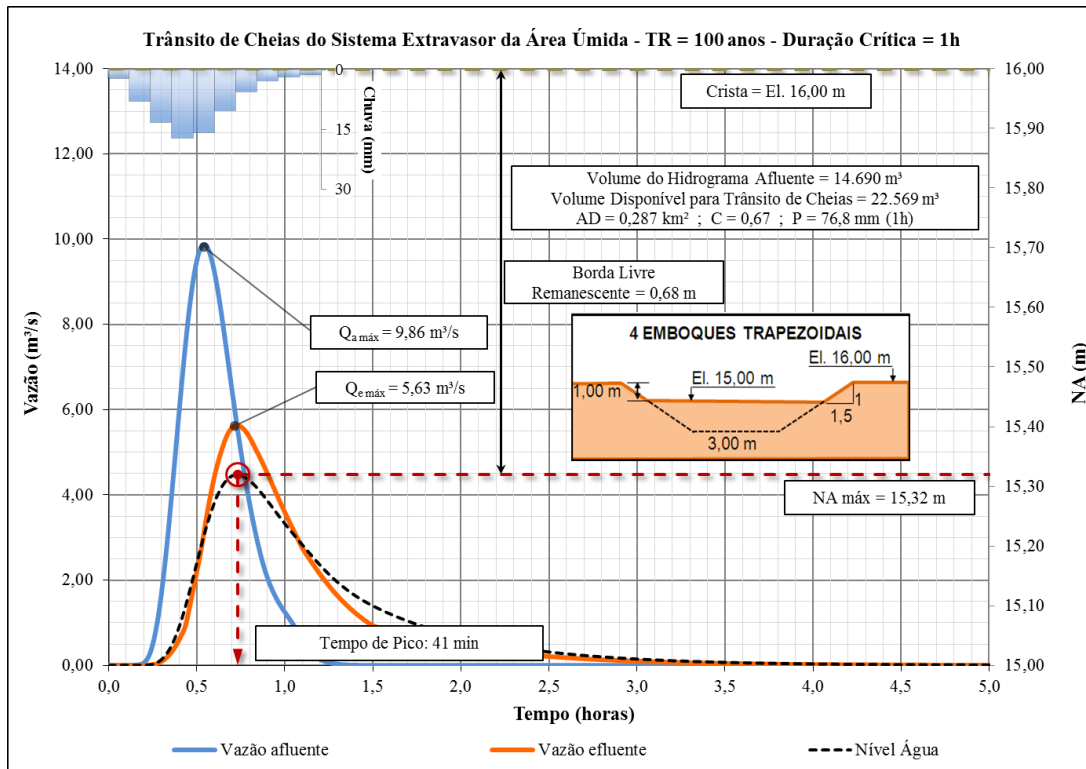
AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DO PROJETO EXECUTIVO DO DRS2


Figura 7.11 – Sistema Extravador da Área Úmida – Trânsito de Cheias (Duração Crítica = 1 hora)

7.5.1.2 Sistema extravasor da faixa estrutural

O sistema extravasor da faixa estrutural tem a função de escoar a drenagem superficial da pilha de resíduo quando a mesma se encontra acima da El. 16,00m. Dessa forma, é distribuída a vazão produzida por toda a área de contribuição da pilha entre os extravasores. No cenário avaliado foram adotados 22 extravasores, tendo sido dimensionado para eventos chuvosos de TR = 100 anos.

Os extravasores são compostos por caixas coletoras operadas ou não por *stops logs*, associadas a uma ou duas galerias em um tubo de concreto com diâmetro nominal de 0,80m e declividade mínima de 1,0% (Figura 7.12). A quantidade de galerias em cada tipo de extravasor é apresentada na Tabela 7.7.

AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DO PROJETO EXECUTIVO DO DRS2

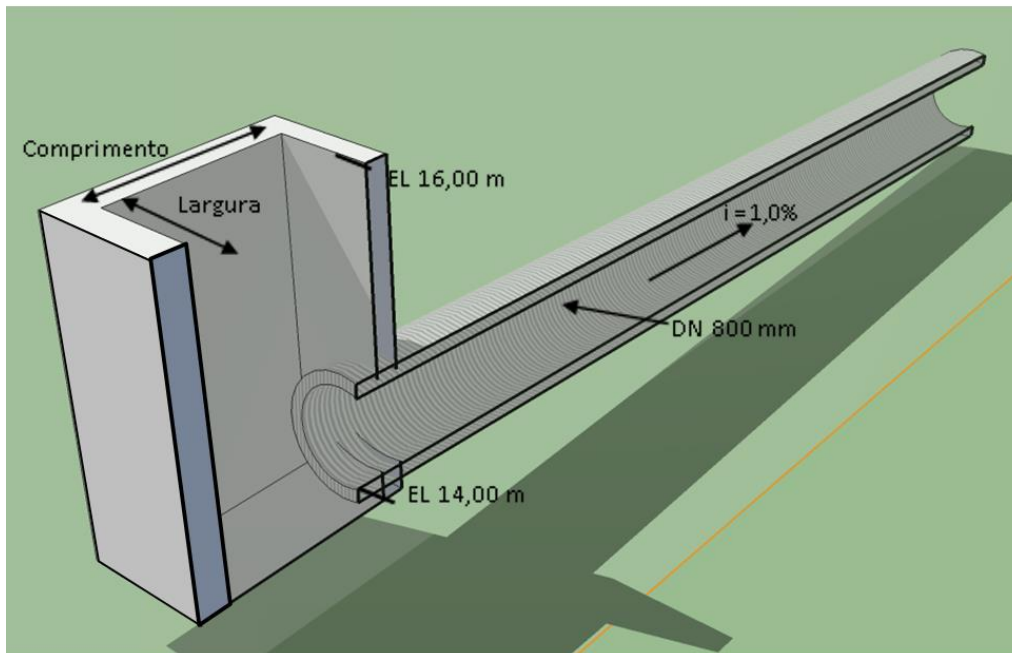


Figura 7.12 – Croqui dos extravasores da faixa estrutural e Célula de Contingência (DB-3541-54-G-098)

Tabela 7.7 – Quantidade de galerias em cada tipo de extravasor (DB-3541-54-G-098)

Tipo de extravasor	Galerias em tubo de concreto ($\varnothing = 0,80$ m)
Tipo 1* e 2	1
Tipos 3*, 4 e 5*	2

***Os extravasores dos tipos 1, 3 e 5 possuem aberturas que podem ser operadas por stop-logs abaixo da El. 16,00 m**

As vazões obtidas para cada extravasor são apresentados na Tabela 7.8

AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DO PROJETO EXECUTIVO DO DRS2
Tabela 7.8 – Definição das vazões de projeto das bermas e descidas de água pela faixa estrutural do DRS2 (DB-3541-54-G-098)

Extravador	Quantidade de galerias	A _D (m ²)	I _{mínima} (%)	T _c (min)	TR (anos)	P (mm)	i (mm/h)	Q _{proj} (m ³ /s)
TP2-10	1	24.322	1,00	10	100	26,3	157,8	0,587
TP1-08	1	22.579	1,00	10	100	26,3	157,8	0,545
TP2-09	1	22.510	1,00	10	100	26,3	157,8	0,543
TP2-08	1	22.183	1,00	10	100	26,3	157,8	0,535
TP1-07	1	20.256	1,00	10	100	26,3	157,8	0,489
TP2-07	1	10.208	1,00	5	100	17,5	210,0	0,328
TP1-06	1	14.347	1,00	5	100	17,5	210,0	0,461
TP2-06	1	18.921	1,00	5	100	17,5	210,0	0,608
TP3-01	2	34.905	1,00	10	100	26,3	157,8	1,072
TP4-01	2	63.960	1,00	10	100	26,3	157,8	1,964
TP5-01	2	53.025	1,00	15	100	36,2	144,8	1,494
TP2-05	1	18.371	1,00	5	100	17,5	210,0	0,590
TP1-05	1	11.254	1,00	5	100	17,5	210,0	0,361
TP1-04	1	19.474	1,00	15	100	36,2	144,8	0,431
TP2-04	1	20.484	1,00	15	100	36,2	144,8	0,454
TP1-03	1	22.731	1,00	10	100	26,3	157,8	0,548
TP2-03	1	21.646	1,00	10	100	26,3	157,8	0,522
TP2-02	1	27.485	1,00	10	100	26,3	157,8	0,663
TP1-02	1	24.436	1,00	10	100	26,3	157,8	0,590
TP2-01	1	23.498	1,00	15	100	36,2	144,8	0,520
TP1-01	1	17.012	1,00	5	100	17,5	210,0	0,546
TP1-09	1	34.392	1,00	15	100	36,2	144,8	0,761

Legenda:

Cada extravasor é designado por “TPX-0Y”, em que X é o tipo do extravasor e Y é a identificação do extravasor do tipo X. I_{mínima} – Declividade Mínima; tc – Tempo de Concentração; P – Altura de Precipitação; i – Intensidade da Chuva de Projeto; Q_{proj} – Vazão de Projeto; A_D = área de drenagem.

Por fim, com base nos extravasores que apresentaram maior vazão, é apresentado o NA máximo observado nas simulações destes trechos mais restritivos

- Extravasor com 1 galeria: vazão máxima = 0,761 m³/s; NA máximo = El. 14,84 m; borda livre de 1,16m

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DO PROJETO EXECUTIVO DO DRS2		

- Extravasor com 2 galerias: vazão máxima = 1,964 m³/s; NA máximo = El.15,03 m; borda livre de 0,97m.

7.5.1.3 Bombeamento das bacias BC201 e BC202 e célula de emergência

Para a avaliação do sistema de bombeamento das bacias de controle BC201 e BC202 frente a passagem de cheias no período chuvoso 2021-2021, foi considerado o seguinte cenário: bombeamento conjunto da BC201 e BC202 com capacidade instalada de 1.550 m³/h em cada bacia (RT-469133-54-G-005). Consideradas diversas durações de precipitações associadas a 10.000 anos de tempo de retorno. O relatório de segurança do DRS2 frente a passagem de cheias no período 2021-2022 (GWS Engenharia, 2021), dividiu as áreas de drenagem conforme apresentado na Figura 7.13.

AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DO PROJETO EXECUTIVO DO DRS2

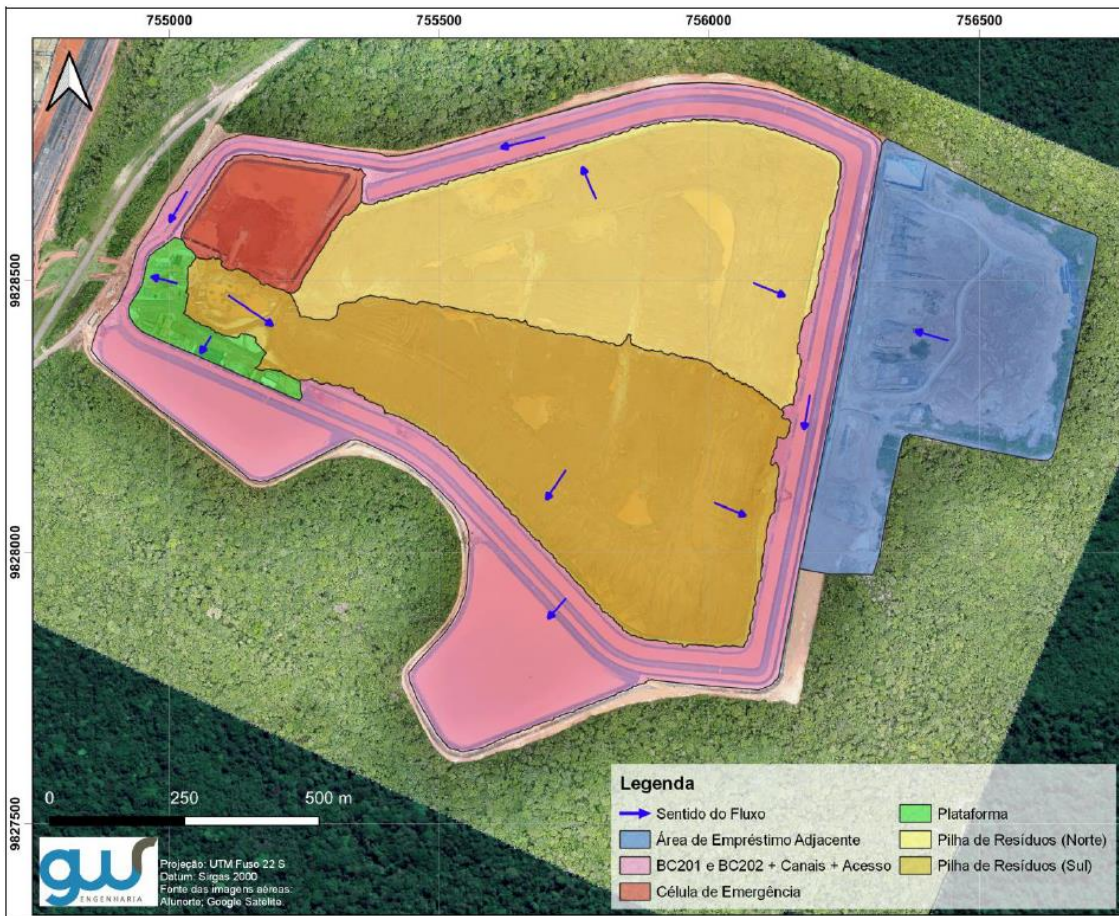


Figura 7.13 – Áreas de drenagem consideradas no DRS2

O diagrama topológico construído com o *software* HEC HMS é apresentado na Figura 7.14.

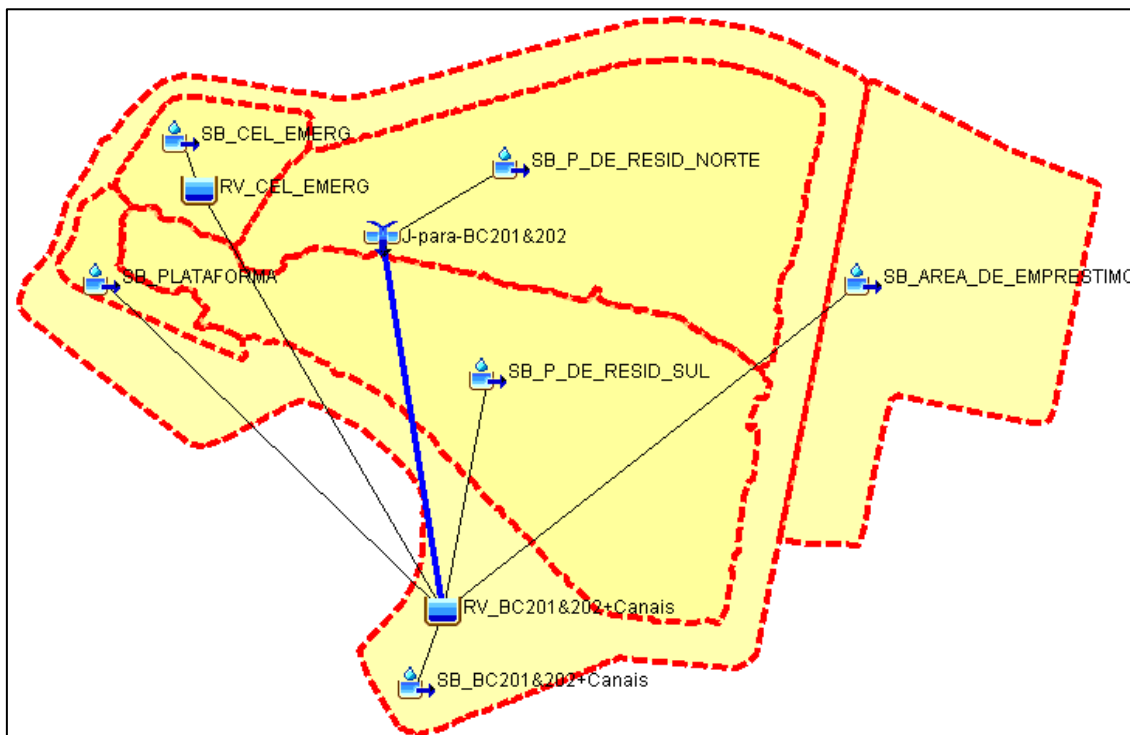


Figura 7.14 – Diagrama topológico considerado para o dimensionamento da vazão de bombeamento (RT-469133-54-G-005).

Os critérios e premissas da modelagem da BC201 e BC202 são apresentados abaixo:

- **Bacia Hidrográfica de Contribuição:** As áreas de drenagem incluem a área de disposição de resíduo (área seca e área úmida). Foi considerado o instante da operação do DRS2 em que a pilha de resíduo se encontra totalmente conformada, com separação entre resíduo seco e resíduo úmido. Dessa forma, não foi considerado amortecimento de cheias no depósito de resíduo do DRS2
- **Reservatório:** Os reservatórios das bacias BC201 e BC202, do Canal Externo e do Canal Interno (de contenção de sedimentos) foram tratados nas simulações como um único reservatório, com fundo na El. 8,90 m e crista na El. 15,20 m;
 - A célula de emergência também foi considerada como um reservatório independente, com fundo na El. 11,50 m e crista na El. 15,50 m.

AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DO PROJETO EXECUTIVO DO DRS2

- **Volume Disponível para Amortecimento (trânsito da cheia de projeto):** O volume livre disponível para o amortecimento da cheia de projeto corresponde à seguinte composição:
 - Bacias BC201 e BC202: 70% do volume entre as El. 10,00 m e 15,50 m;
 - Canal Externo: 70% do volume entre as El. 12,25 m e 15,50 m; e
 - Canal Interno: 70% do volume entre as El. 13,00 m e 15,50 m.
- **Condições Iniciais:** Foi considerado nível de água inicial no reservatório na El. 10,00 m (1,00 m acima do fundo das bacias BC201 e BC202).
- **Capacidade do sistema de bombeamento:** Foi considerada capacidade do sistema de bombeamento de 1.550 m³/h por bacia de controle.

A curva cota-volume dos reservatórios (BC201, BC 202, canal interno e canal externo) é apresentada na Figura 7.15. Por outro lado, a curva cota-volume da célula de emergência é apresentada na Figura 7.16.

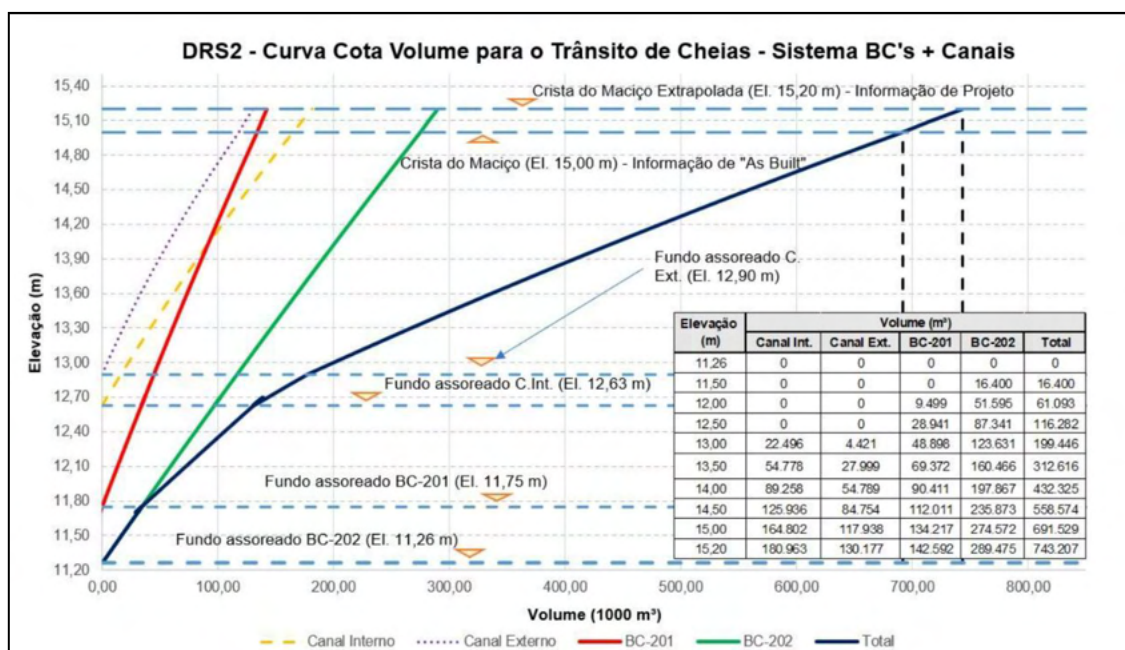


Figura 7.15 – Bombeamento nas bacias BC201 e BC202 – curva cota-volume (RT-469133-54-G-005).

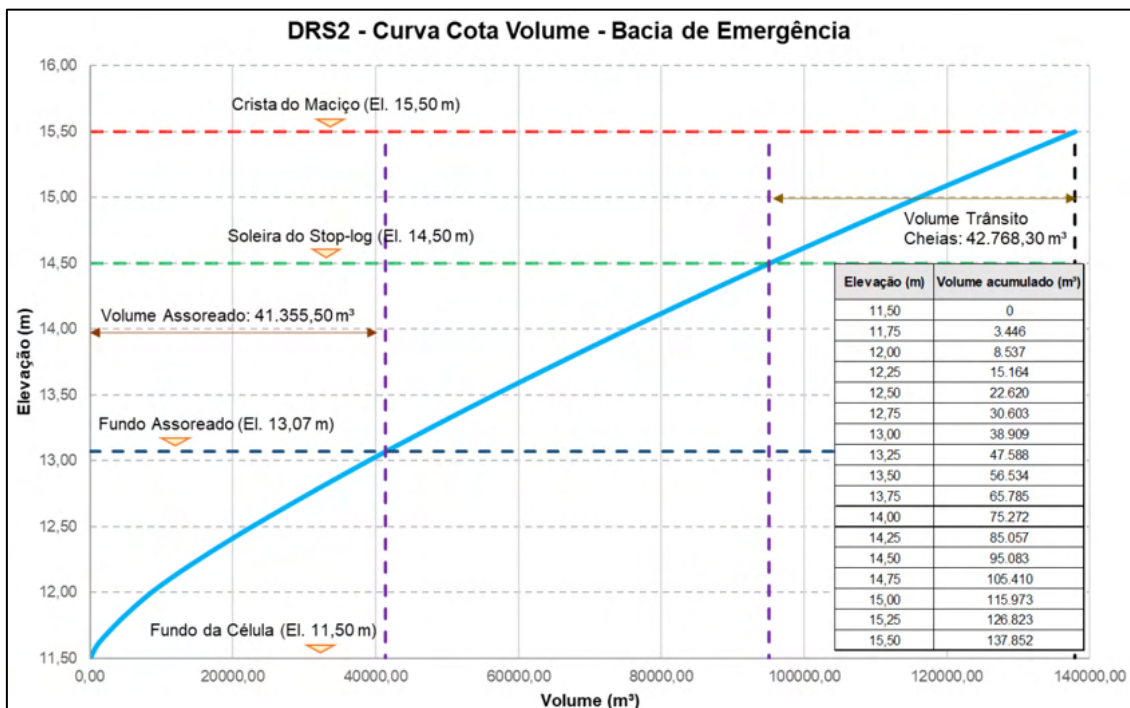
AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DO PROJETO EXECUTIVO DO DRS2


Figura 7.16 – Curva cota volume da Célula de Contingência (RT-469133-54-G-005)

Como resultados do trânsito de cheias do sistema extravasor das bacias BC201 e BC202 e célula de emergência, são apresentados a Tabela 7.9 e Figura 7.17. Nota-se que todas as estruturas apresentam segurança hidráulica para o trânsito de cheias decorrente de precipitação associada ao TR de 10.000 anos, assim como foi previsto no projeto executivo do depósito. Pode-se afirmar que os sistemas extravasores estão compatíveis com o que foi proposto no projeto executivo.

AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DO PROJETO EXECUTIVO DO DRS2
Tabela 7.9 – Resultados do Trânsito de Cheias – Sistema Extravasor das Bacias BC201 e BC202 (DB-3541-54-G-098).

DRS2 – Bombeamento	BC201 e BC202 + Canais de contorno	Célula de Emergência
Cheia de Projeto	TR 10.000 anos	
Duração crítica da precipitação de projeto	15 dias ¹	12 horas
Precipitação de projeto (mm)	1205,3	358,8
Vazão máxima afluyente (m ³ /s)	2,81	1,05
Vazão máxima efluyente (m ³ /s)	0,861 m ³ /s (=3100 m ³ /h)	0,26 m ³ /s
Elevação da crista do Reservatório (m)	15,20	15,50
Elevação da soleira do sistema extravasor – NA máximo normal (m)	-	14,50
Volume do hidrograma afluyente (1.000 m ³)	1.563,07	19,34
Nível de assoreamento (m)	11,75 (BC-201) / 11,26 (bc-202) / 12,63 (Canal Interno) / 12,90 (Canal Externo)	11,50
NA inicial (m)	11,60	14,50
NA máximo Maximorum (m)	14,64	14,85
Volume disponível para amortecimento de cheias (1.000 m ³)	743,21	42,77
Borda livre remanescente (m)	0,56	0,65

¹ Salienta-se que não foi encontrada a duração crítica do evento de chuva, em virtude da grande inércia volumétrica das Bacias BC201 e BC201, sendo adotada a duração máxima definida nos estudos de chuvas intensas.

AValiação da compatibilidade do projeto executivo do DRS2

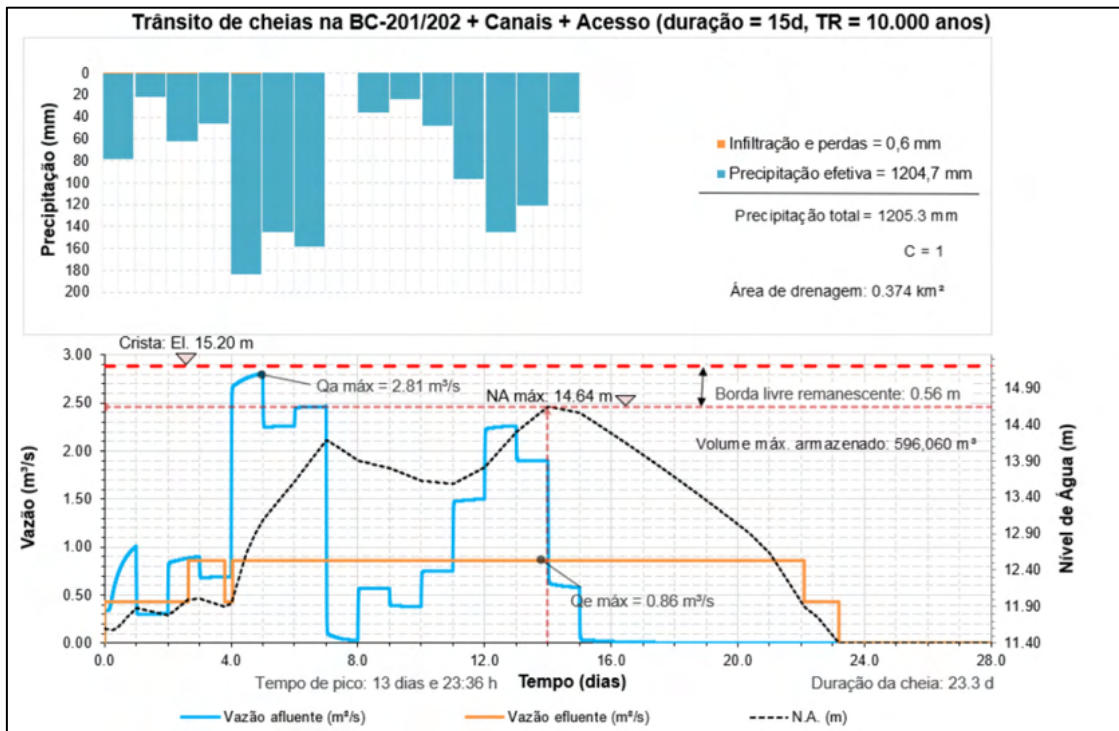


Figura 7.17 – resultado do trânsito de cheias na BC201/202 + canais e acesso, duração crítica de 15 dias e TR de 10.000 anos (RT-469133-54-G-005).

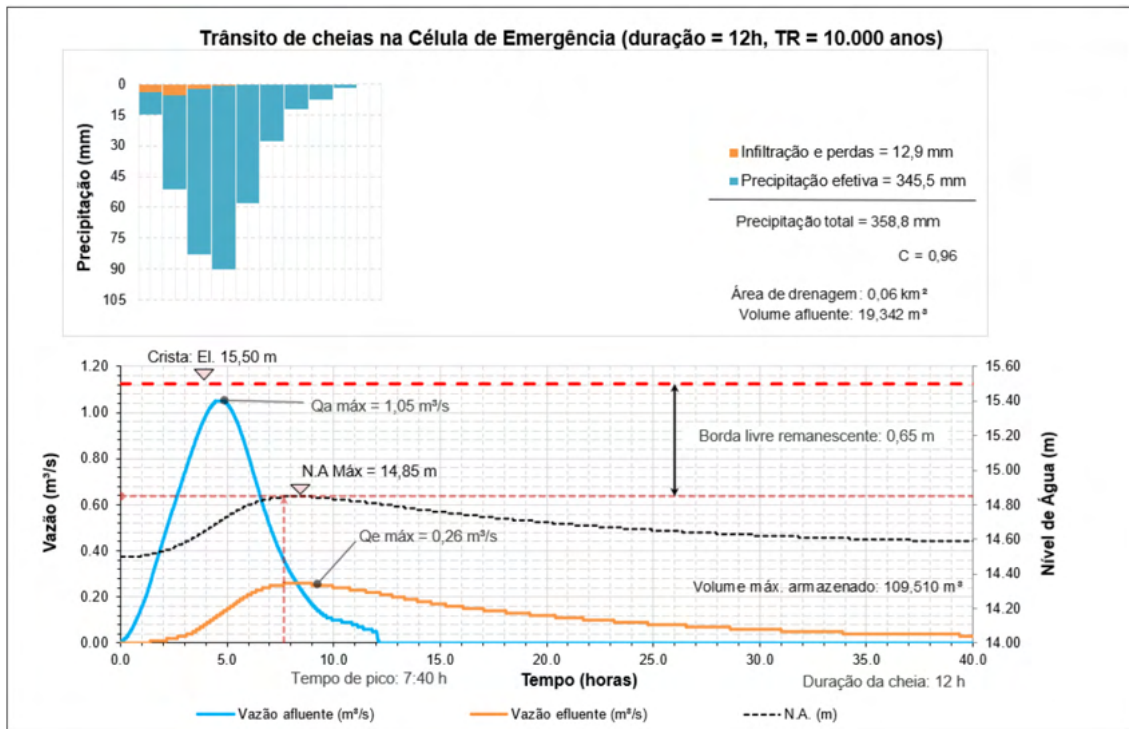
AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DO PROJETO EXECUTIVO DO DRS2


Figura 7.18 – Resultado do trânsito de cheias para a célula de emergência – TR 10.000 anos e duração crítica de 12 horas (RT-469133-54-G-005)

7.5.2 Drenagem superficial

Para o dimensionamento da drenagem superficial foi adotado o método racional, o qual é empregado para áreas de drenagem inferiores a 1,0 km², conforme recomendações de Pinheiro (2011). O coeficiente adimensional de escoamento superficial (C) adotado foi de 0,55 para o resíduo e 1,0 para áreas impermeabilizadas pela geomembrana.

A vazão admissível nas estruturas de drenagem foi determinada pela equação de *Manning*, que considera o escoamento em regime permanente e uniforme. Tendo sido adotado coeficiente de rugosidade (n) igual a 0,015 para dispositivos com acabamento em concreto liso, 0,023 para dispositivos escavados no rejeito e 0,030 para as descidas de água em degraus, essa última na tentativa de representar o efeito de redução da energia do fluxo por meio dos degraus. Por fim, adotou-se o critério de borda livre mínima equivalente a 20% da altura do dispositivo.

AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DO PROJETO EXECUTIVO DO DRS2

A declividade mínima para os dispositivos de drenagem adotado foi de 0,5% e para as escadas de 1,0% quando passam pelas bermas do DRS2. Excepcionalmente nas canaletas periféricas da pilha de resíduo foi adotada declividade inferior para possibilitar desaguamento nos extravasores do depósito, sendo de no mínimo 0,25%.

Foram utilizados quantis de chuvas associados a 100 anos de tempo de retorno para o dimensionamento, conforme ABNT NBR 13.028. As áreas de drenagem foram traçadas conforme projeto.

A drenagem superficial do DRS2 se divide entre drenagem superficial da área da plataforma e drenagem periférica da pilha.

Como resultado da drenagem da plataforma e drenagem periférica é apresentado a Tabela 7.10 (vazões de dimensionamento) e Tabela 7.11 (seções transversais).

Tabela 7.10 – Definição das vazões de projeto dos dispositivos de drenagem da plataforma (adaptado de DB-3541-54-G-098).

Dispositivo	A_D (m^2)	Comprimento (m)	$I_{mínima}$ (%)	t_c (min)	TR (anos)	P (mm)	i (mm/h)	Q_{proj} (m^3/s)
CR-01	11.109	179,87	0,50	10	100	26,3	157,8	0,396
CR-02	19.914	189,35	0,50	10	100	26,3	157,8	0,790
CR-03	4.245	130,10	0,50	5	100	17,5	210,0	0,248
CR-04	6.853	119,71	0,50	5	100	17,5	210,0	0,400
CR-05	7.487	124,28	0,50	5	100	17,5	210,0	0,437
CR-06	11.098	5,74	1,00	5	100	17,5	210,0	0,648
CR-07	7.487	1,18	1,00	5	100	17,5	210,0	0,437
CRP	5.874	-	0,25	10,0	100	26,3	157,8	0,180

Legenda: CRP – Canaleta Retangular Periférica ; CR – Canaleta Retangular; $I_{mínima}$ – Declividade

Mínima; t_c – Tempo de Concentração; P – Altura de Precipitação; i – Intensidade da Chuva de Projeto;

Q_{proj} – Vazão de Projeto

AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DO PROJETO EXECUTIVO DO DRS2
Tabela 7.11 – Definição das seções transversais dos dispositivos de drenagem da plataforma (adaptado de DB-3541-54-G-098).

Dispositivo	Largura de base (m)	Altura (m)	Coefficiente de Manning	Q _{adm} (m ³ /s)	Revestimento
CR-01	0,60	0,60	0,015	0,440	Concreto liso
CR-02	0,80	0,80	0,015	0,948	Concreto liso
CR-03	0,60	0,60	0,015	0,440	Concreto liso
CR-04	0,60	0,60	0,015	0,440	Concreto liso
CR-05	0,60	0,60	0,015	0,440	Concreto liso
CR-06	0,80	0,80	0,015	1,341	Concreto liso
CR-07	0,60	0,60	0,015	0,623	Concreto liso
CRP	0,60	0,40	0,015	0,185	Calha lisa

Legenda: CR – Canaleta Retangular; CRP – Canaleta Retangular Periférica; $I_{\text{mínima}}$ – Declividade Mínima; t_c – Tempo de Concentração; P – Altura de Precipitação; i – Intensidade da Chuva de Projeto; Qproj – Vazão de Projeto

7.5.3 Considerações da Fontes

Os estudos hidrológicos e hidráulicos do DRS2 englobaram também a verificação hidráulica dos canais e bacias de contenção. O dimensionamento adotou critérios e premissas compatíveis com as práticas de engenharia e normas brasileiras (ABNT NBR 13.028/2017 e ABNT NBR 13.029/2017), tendo sido o tempo de retorno adotado de acordo com as consequências de eventual falha de cada estrutura, compatível com recomendações da literatura (PINHEIRO, 2011). Além disso, notou-se que foi prevista borda livre adequada em todas as estruturas.

Por meio das visitas técnicas realizadas ao DRS2 foi possível constatar a existência e implantação de estruturas de drenagem e controle hidráulico citadas em projeto. Como exemplo das estruturas observadas durante a visita apresenta-se a célula de emergência do DRS2 (Figura 7.19); Canal de contorno entre as bacias BC201 e BC202 (Figura 7.20) e a visualização em satélite da localização dos extravasores da área interna do DRS2 (Figura 7.21).

AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DO PROJETO EXECUTIVO DO DRS2



Figura 7.19 – Célula de emergência do DRS2

AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DO PROJETO EXECUTIVO DO DRS2



Figura 7.20 - Canal de contorno entre as bacias BC201 e BC202

AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DO PROJETO EXECUTIVO DO DRS2

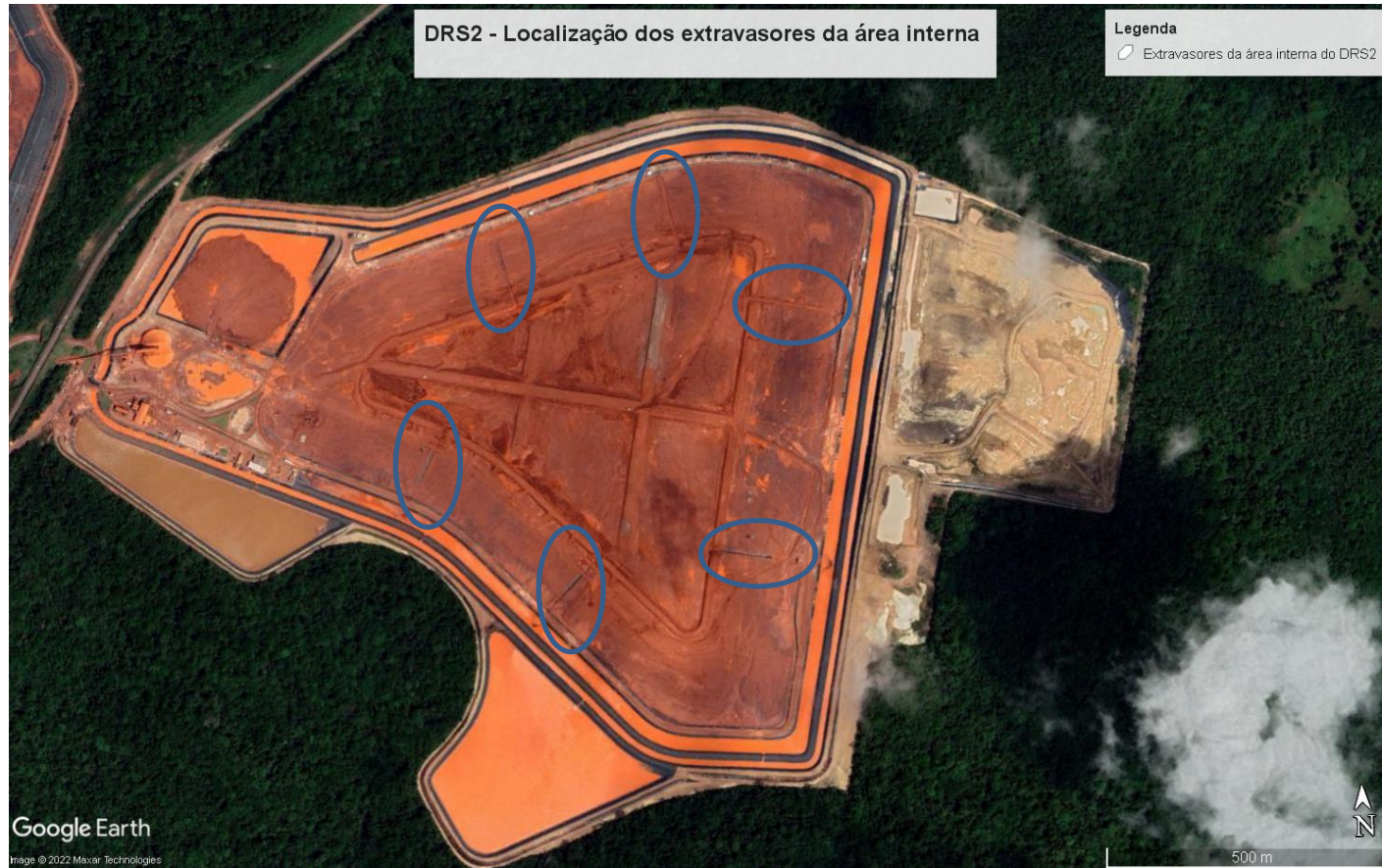


Figura 7.21 – Visualização de satélite dos extravasores da área úmida (Google Maps, imagem de janeiro/2022)

AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DO PROJETO EXECUTIVO DO DRS2

Ressalta-se a elevada capacidade de bombeamento existente nas bacias de controle BC201 e BC202, que aduzem as águas em direção à Estação de tratamento na área 82. Nestes termos, na área 82 deve ser garantida a capacidade de tratamento das vazões de pico e/ou estruturas de amortecimento dos picos de vazão de forma a viabilizar o tratamento de todo o volume aduzido. Esta recomendação visa prevenir eventuais insuficiências hidráulicas nas estruturas auxiliares e externas aos depósitos.

8. CONCLUSÕES

A letra “A” da TAC 3.1 (Compatibilidade do projeto executivo dos depósitos com a sua efetiva execução) corresponde ao item mais abrangente da auditoria. Neste relatório foram verificados: os tratamentos de fundação; o dimensionamento do sistema de impermeabilização (geomembrana de PEAD); o controle construtivo dos diques de contorno; a segurança da estrutura do ponto de vista da estabilidade física e estrutural através de análise de estabilidade; e a solução hidráulica para as águas superfícies conforme critérios consagrados de engenharia, para suportar eventos chuvosos extremos sem que ocorram trasbordamentos.

8.1 Tratamento de Fundação

Em relação aos tratamentos da fundação, o Relatório técnico “Como Construído” do Depósito DRS2, elaborado pela PIMENTA DE AVILA em julho/2018, indica que foram realizadas escavações no terreno do DRS2 para se alcançar um material com características geotécnicas aceitáveis para assentamento do aterro compactado, conforme especificado no projeto. Além da escavação da chaveta, foram realizadas escavações para toda a área dos canais de contorno, bacias de controle e Célula de Contingência.

AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DO PROJETO EXECUTIVO DO DRS2

O Relatório “Como Construído” acrescenta que antes do lançamento da primeira camada de aterro foi realizada a preparação das fundações. A avaliação do controle de compactação da fundação foi realizada por meio do método de Hilf, sendo realizado um total de 68 ensaios na fundação. Foi obtida a média do grau de compactação de 100,4%, com desvio padrão de 1,4, e a média do desvio de umidade de 2,50%, com desvio padrão de 0,40. Desta forma, foi possível verificar que foi realizada a preparação da fundação antes do lançamento da primeira camada de aterro e foi respeitado o critério de grau de compactação mínimo de 98% do Proctor Normal.

8.2 Sistema de Impermeabilização

A avaliação do sistema de impermeabilização do DRS1 foi abordada nas letras “N” e “O” da TAC 3.1. No relatório referente a letra “N” (doc. FG-2201-NHB-A-BA-RT12-00), a FONNTES concluiu que foi adotado valor de espessura da geomembrana adequado sob os resíduos para atender aos esforços que o DRS2 irá exercer ao final de sua implantação (1,5 mm de espessura). Além disso, também foi identificado que a gramatura do geotêxtil de proteção ao puncionamento está dimensionada de forma conservadora e a vala de ancoragem da geomembrana também estão adequados.

As geomembranas projetadas com 1,0 mm de espessura, recomendadas apenas para proteção de taludes possuem carregamento desprezível em relação a resistência do material geossintético e dispensam verificação. Foi sugerido a menor espessura disponível pelo fabricante ou substituição por grama em placa, por serem regiões sem contato com os resíduos. Portanto, as verificações conduzidas pela FONNTES resultaram em um dimensionamento similar aquele calculado no projeto do Depósito DRS2.

Conforme indicado no documento FG-2201-NHB-A-BA-RT12-00, referente a letra “O” da TAC 3.1, após a análise dos registros disponíveis, foi possível concluir que os testes destrutivos e não destrutivos para verificação da estanqueidade da geomembrana foram feitos sob supervisão constante, além de ter sido indicada cada anomalia ocorrida

AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DO PROJETO EXECUTIVO DO DRS2

durante a atividade. Dessa forma, é possível afirmar que a aplicação e verificação da integridade, qualidade e estanqueidade da geomembrana ocorreu dentro dos padrões de engenharia esperados.

Com base no documento FG-2201-NHB-A-BA-RT08-00, referente a avaliação da instrumentação de controle (letra “D” desta TAC3.1), em relação aos instrumentos de monitoramento do nível freático / piezométrico dos diques de controle, observa-se que, de modo geral, os piezômetros Casagrande instalados na crista do dique de contorno com cota de fundo abaixo do nível d’água registrado nos poços de monitoramento adjacentes ao DRS2, apresentaram leituras sensíveis às precipitações, com oscilações em suas leituras similares aos poços de monitoramento. Tal tendência também foi observada nos piezômetros elétricos localizados no interior do DRS2, mais próximos ao dique de contorno.

Já os piezômetros elétricos das seções instalados mais a montante, e afastados do dique de contorno, possuem a cota de fundo mais elevada do que os piezômetros do dique de contorno. Com isso, esses instrumentos estão acima do nível d’água registrado nos poços de monitoramento e se mostram pouco sensíveis as precipitações (pois estão abaixo da geomembrana de impermeabilização, indicando leituras mais constantes, geralmente secos.

Além das sete seções instrumentadas do Depósito DRS2, existem duas seções localizadas nas Bacias BC-201 e BC-202. Verificou-se que em ambas as seções o nível d’água da Bacias BC-201 e BC-202 se encontram significativamente mais elevados do que os níveis piezométricos registrado nos piezômetros PZC-02 (cerca de 5,0 m) e PZC-04 (cerca de 9,0 m), respectivamente. Tendo em vista que o nível d’água se encontra mais elevado nas bacias do que no Dique de Contorno, é possível constatar que há boa performance em relação à estanqueidade da geomembrana PEAD que reveste as estruturas.

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DO PROJETO EXECUTIVO DO DRS2		

8.3 Controle construtivo dos diques de contorno

Em relação ao controle construtivo dos diques de contorno, o Relatório técnico “Como Construído” do Depósito DRS2, elaborado pela PIMENTA DE AVILA em julho/2018, apresenta os critérios do controle tecnológico de compactação e liberação das camadas utilizando o método de Hilf. O relatório apresenta os histogramas de frequência do grau de compactação e do desvio de umidade para 580 amostras ensaiadas relativas à execução do aterro, separadas por estruturas.

Com base na avaliação dos histogramas de frequência do grau de compactação, a FONNTES observa que o grau de compactação está em torno de 101,3% em relação ao Proctor Normal, apresentando média máxima de 101,5% para a plataforma variável. Portanto, a média dos graus de compactação em todas as estruturas de aterro compactado foram superiores ao 100% em relação ao Proctor Normal, indicado na Especificação Técnica de Construção Projeto Detalhado. No caso da avaliação dos histogramas de frequência dos desvios de umidade, a FONNTES observa que os desvios de umidade estão em torno de 2,50% abaixo da umidade ótima. Portanto, abaixo do limite inferior de 2% abaixo da umidade ótima do Proctor Normal indicado na Especificação Técnica de Construção Projeto Detalhado.

8.4 Análises de estabilidade

Em relação as análises de estabilidade, foram realizadas em três seções geológico-geotécnicas, representativas do DRS2. Os resultados das análises de estabilidade para condição atual estática, pseudoestática e não drenada do Depósito DRS1 ao longo das seções analisadas foram apresentados no documento FG-2201-NHB-A-BA-RT26-00. Os resultados foram comparados com àqueles obtidos no último relatório de auditoria (Doc. RT-469137-54-G-0002_rev03.) e com a Norma ABNT NBR 13.028/2017 e a Resolução ANM Nº. 95, de 07/02/2022.

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DO PROJETO EXECUTIVO DO DRS2		

Os cálculos realizados pela FONNTES e pela GEOCONSULTORIA resultaram em fatores de segurança parecidos, sem diferenças significativas. Essas diferenças podem estar relacionadas com o fato de a GEOCONSULTORIA apresentar os fatores de segurança com 1 (uma) casa decimal, enquanto a FONNTES apresentou com 2 (duas) casas decimais. A partir dos fatores de segurança obtidos, foi possível concluir que para todas as seções os cenários de simulação estudadas do DRS2 (condição estática, condição pseudoestática e condição não drenada de pico) foram obtidos fatores de segurança satisfatórios, ou seja, superiores aos recomendados pela Norma ABNT NBR 13.028/2017 e Resolução Nº 95, de 7 de fevereiro de 2022.

8.5 Gestão das águas superficiais

Em relação a gestão de águas superficiais, foi apresentado os principais critérios e premissas do dimensionamento das estruturas de drenagem e bombeamento, bem como os resultados e metodologia adotada. Foi verificado que a mesma atende as normas em vigor para estruturas de mineração como as ABNT NBR 13028/2017 e 13029/2017. Além disso, foi observado por meio do documento de “Avaliação da segurança do DRS2 frente à passagem de cheias no período chuvoso 2021/2022”, que o depósito apresenta segurança hidráulica tal como foi previsto no seu projeto executivo original. Por meio da visita realizada em campo e imagens de satélite não foi possível identificar desvios entre as estruturas projetadas e as estruturas dimensionadas conforme projeto e implementadas conforma a fase de operação do depósito.

Ressalta-se a elevada capacidade de bombeamento existente nas bacias de controle BC201 e BC202, que aduzem as águas em direção à Estação de tratamento na área 82. Nestes termos, na área 82 deve ser garantida a capacidade de tratamento das vazões de pico e/ou estruturas de amortecimento dos picos de vazão de forma a viabilizar o

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DO PROJETO EXECUTIVO DO DRS2		

tratamento de todo o volume aduzido. Esta recomendação visa prevenir eventuais insuficiências hidráulicas nas estruturas auxiliares e externas aos depósitos.

9. REFERÊNCIAS

- i. ALMARAZ, U. J. S. (1977). Aspectos Geoquímicos e Ambientais dos Calcários do Formação Pirabas, Pará. Tese de Doutorado, UFRS, 272 p.
- i. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, NBR 13.028: Mineração – Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeito, contenção de sedimentos e reservação de Rejeito, Rio de Janeiro, novembro de 2017.
- ii. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, NBR 13.029: Mineração – Elaboração e apresentação de projeto de disposição de estéril em pilha, Rio de Janeiro, novembro de 2017.
- iii. BRASIL, Lei 12.305 – Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília, 2010.
- iv. BRASIL, Lei 12.651 – Código Florestal Brasileiro. Brasília, 2012.
- v. FARIAS, E.S.; NASCIMENTO, F.S., FERREIRA, M.A.A. (1992). Estágio de Campo III: relatório final. Área Belém - Outeiro. Belém: Centro de Geociências. Universidade Federal do Pará. 247 p.
- vi. HAQ, B.V.; HARDENBOL, J.; VAIL, P.R. (1987). Chronology of Fluctuating Sea Levels Since the Triassic (250 million years ago to present). Science, 235: 1156-1167 p.
- vii. HUFF, F. A. Time distribution of rainfall in heavy storms. Water Resources Research, v. 3, n. 4, p. 1007-1019, 1967.
- viii. IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Barcarena/PA. População. 2010. Disponível em <IBGE | Cidades@ | Pará | Barcarena | Panorama>

AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DO PROJETO EXECUTIVO DO DRS2

- ix. _____. Barcarena/PA. Educação. 2010b. Disponível em <IBGE | Cidades@ | Pará | Barcarena | Panorama>
- x. _____. Barcarena/PA. Economia. 2019. Disponível em <IBGE | Cidades@ | Pará | Barcarena | Panorama>
- xi. _____. Barcarena/PA. Trabalho e Rendimento. 2020. Disponível em <IBGE | Cidades@ | Pará | Barcarena | Panorama>
- xii. _____. Barcarena/PA. Território e ambiente. 2021. Disponível em <IBGE | Cidades@ | Pará | Barcarena | Panorama>
- xiii. KOERNER, ROBERT (1998). "Designing with Geosynthetics". Xlibris Corporation. 6ta Edição. Vol 2. New Jersey, USA. 914pp.
- xiv. MABESOONE, J. M. e CASTRO, C. (1975). Desenvolvimento Geomorfológico do Nordeste brasileiro. Boletim do Núcleo Nordeste da SBG, Recife, v.3, p. 05- 35.
- xv. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Resolução CONAMA Nº 237**, de 19 de dezembro de 1997.
- xvi. NAREJO, D.; KOERNER, R.M.; WILSON FAHMY, R.F. **Puncture protection of geomembranes. Part II: experimental**. Geosynthetics International 3(5): 629-653 1996
- xvii. PINHEIRO; M. C. Diretrizes para elaboração de estudos hidrológicos e dimensionamentos hidráulicos em obras de mineração. ABRH. Porto Alegre, 2011. 308 p.
- xviii. ROSSETTI D.F. & VALERIANO M.M. 2007. Evolution of the lowest Amazon basin modeled from the integration of geological and SRTM topographic data. Catena, 70:253-265.
- xix. VERTEMATTI, J.C. (2015). "Manual Brasileiro de Geossintéticos". CTG ABINT. Editorial Blucher. 2da Edição Atualizada e Ampliada. São Paulo, Brasil. 568pp.



FONNTES
G E O T É C N I C A

WEBSITE

www.fonntesgeotecnica.com

TELEFONES

(31) 3582-9185

(31) 3582-9186

Endereço: Avenida Otacílio Negrão de Lima, 2837
– São Luiz (Pampulha).
Belo Horizonte / MG. CEP: 31365-450