

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 revisão do Projeto de revestimento e monitoramento dos taludes, em atendimento à letra “L” do Termo de Compromisso de Ajustamento de Conduta, celebrado entre a HYDRO, ALUNORTE, 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 DRS1 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

RELATÓRIO TÉCNICO DE REVISÃO DO PROJETO DE REVESTIMENTO E MONITORAMENTO DOS TALUDES DO DRS1

CLIENTE:



PROJETO:

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

BARCARENA - PA



agosto/2023

SUMÁRIO

GLOSSÁRIO	1
1. INTRODUÇÃO	3
2. OBJETIVO.....	6
3. DADOS UTILIZADOS	7
4. ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO	8
5. APRESENTAÇÃO DA ESTRUTURA	9
5.1 LOCALIZAÇÃO	12
5.2 ASPECTOS GEOLÓGICOS	18
5.2.1 <i>Histórico de Investigações</i>	20
5.2.2 <i>Geologia Local</i>	20
5.3 DRENAGEM INTERNA	22
5.4 SISTEMA EXTRAVASOR E DRENAGEM SUPERFICIAL	22
5.5 INSTRUMENTAÇÃO	22
5.6 FECHAMENTO DO DEPÓSITO DRS1	23
6. METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO	26
7. DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO.....	28
7.1 AVALIAÇÃO DA DENSIDADE DE DRENAGEM DO DRS1	28
7.1.1 <i>Desenvolvimento do Estudo</i>	28
7.1.2 <i>Considerações do Estudo</i>	30
7.1.2.1 Monitoramento da Estabilidade Física	30
7.1.2.2 Monitoramento das Bacias	32
7.1.2.3 Considerações Sobre a Densidade de Instrumentação	33
7.1.2.4 Monitoramento dos Poços Ambientais	34
7.2 INTERPRETAÇÃO DE TESTES RELATIVOS À APLICAÇÃO DE MATERIAIS SOBRE A GEOMEMBRANA	35
7.2.1 <i>Desenvolvimento do Estudo</i>	35
7.2.2 <i>Considerações sobre a aplicação de materiais sobre a geomembrana</i>	36
7.3 INTERPRETAÇÃO DOS ENSAIOS PARA VERIFICAÇÃO DA ESTANQUEIDADE DA GEOMEMBRANA.....	37
7.3.1 <i>Desenvolvimento do Estudo</i>	37
7.3.2 <i>Considerações sobre os ensaios para verificação da estanqueidade</i>	42
8. CONCLUSÕES	44

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS47

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 (As bacias operacionais são BC1, BC2, BC3, BC5 e BC6; e as bacias descaracterizadas são BC4 e BC7)
- CL – Célula Leste
- 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
- MPF – Ministério Público Federal
- MPPA – Ministério Público do Estado do Pará

AVALIAÇÃO DO PROJETO DE REVESTIMENTO E MONITORAMENTO DOS TALUDES

- 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 do 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 - DRS1 e DRS2, do termo de compromisso de ajustamento de conduta, Inquérito Civil -

AVALIAÇÃO DO PROJETO DE REVESTIMENTO E MONITORAMENTO DOS TALUDES

IC n° 001/2018 - MP (SIMP n°000654 -710/2018) MPPA, Inquérito Civil n° 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, 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 dos rejeitos da forma concebida são compatíveis com a estrutura existente e

AVALIAÇÃO DO PROJETO DE REVESTIMENTO E MONITORAMENTO DOS TALUDES

- 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 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 L), relativo à Revisão do Projeto de revestimento e monitoramento dos taludes.

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: “**L) Revisão do Projeto de revestimento e monitoramento dos taludes**”, para o depósito de resíduos DRS1.

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 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

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
AVALIAÇÃO DO PROJETO DE REVESTIMENTO E MONITORAMENTO DOS TALUDES		

escopo do presente trabalho. Abaixo é reproduzido entendimento acordado entre as partes para resposta da pergunta **letra L)**, objeto desse relatório.

O projeto do revestimento de impermeabilização, geomembrana de PEAD, será avaliado com maiores detalhes no Item A), que corresponde ao estudo dos projetos como um todo. O controle tecnológico da execução das geomembranas de PEAD com ensaios de campo e laboratórios serão verificados no Item O). O monitoramento dos taludes será abordado com maiores detalhes na Item D), que é exclusivo sobre instrumentação e monitoramento.

3. DADOS UTILIZADOS

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

AVALIAÇÃO DO PROJETO DE REVESTIMENTO E MONITORAMENTO DOS TALUDES
Tabela 3.1 – Documentos recebidos e utilizados na elaboração deste estudo

CÓDIGO	TÍTULO DO DOCUMENTO	ELABORADO POR	DATA
RT-3540-54-G-1014 R02	Relatório Técnico do Projeto “As Is”	PIMENTA DE AVILA	29/07/21
RT-3540-54-G-581	Relatório Técnico de Avaliação Periódica dos Resultados de Monitoramento da Instrumentação referente a outubro a dezembro/2021	PIMENTA DE AVILA	04/02/2022
RT-8400-54-G-180	Relatório de Acompanhamento da Instrumentação da Linha freática referente a novembro e dezembro/2021	LPS	14/02/2022
- NK03.01 - PM01-R0 - DRS1	Níveis, Bordas Livres e Elevação das Bacias DRS1_DRS2_82F_2021	HYDRO	07/02/2022
RT-469137-54-G-0003 DRS1 RISR 2021.2	Relatório da Inspeção de Segurança Regular do DRS1 2021/2	GEOCONSULTORIA	11/01/2022
-	Monitoramento da qualidade das águas subterrâneas do DRS1	HYDRO	08/02/2022
OM-3540-54-G-1001 R03	Manual de Operação	PIMENTA DE AVILA	05/03/2021
ES-3540-54-G-222	Especificação Técnica de Recebimento, Aceitação e Instalação do Sistema de Impermeabilização da CL3	PIMENTA DE AVILA	15/12/2012
-	Relatório <i>As Built</i> da Impermeabilização da Célula Sul do DRS1	RECORD ENGENHARIA	07/04/2008
RT-3540-54-G-016	Relatório descritivo do projeto executivo da CL3	PIMENTA DE ÁVILA CONSULTORIA LTDA	2012
ES-3541-54-G-100 R02	Especificação técnica de recebimento, aceitação e instalação da geomembrana	PIMENTA DE ÁVILA CONSULTORIA LTDA	2018
-	Relatórios de Serviços de Impermeabilização com Manta PEAD do Depósito DRS1. Número de arquivos: 11	MELO Equipamentos e Serviços de Construção	Out/2013 a Dez/2013, Jan/ 2014 a Abr/2014, Ago/2014 a Nov/2014.

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,

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
AVALIAÇÃO DO PROJETO DE REVESTIMENTO E MONITORAMENTO DOS TALUDES		

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.

5. APRESENTAÇÃO DA ESTRUTURA

Conforme indicado no Relatório Técnico do Projeto “As Is”, elaborado pela PIMENTA DE AVILA em 2021, doc. RT-3540-54-G-570-R01, o depósito DRS1 foi projetado para armazenar os resíduos industriais advindos do beneficiamento da bauxita. Até o ano de 2005, os resíduos industriais eram provenientes exclusivamente do beneficiamento da

AVALIAÇÃO DO PROJETO DE REVESTIMENTO E MONITORAMENTO DOS TALUDES

bauxita da Mineração Rio do Norte (MRN) e, posteriormente a esta data, iniciou-se o beneficiamento da bauxita proveniente da Mineração Bauxita Paragominas (MBP).

O relatório acrescenta que, até novembro de 2018, o sistema utilizado pela ALUNORTE para desagüamento dos resíduos era por filtro tambor, obtendo-se um resíduo com cerca de 60% de teor de sólido. A partir de novembro de 2018, passou-se a utilizar o sistema de filtragem do resíduo por filtro prensa, obtendo-se um teor de sólidos de aproximadamente 78%.

No doc. RT-3540-54-G-570-R01, a PIMENTA DE AVILA (2021) informa que o início da construção do DRS1 ocorreu em 1994. A Figura 5.1 indica os elementos existentes no DRS1 e, a seguir, apresenta-se a sequência construtiva do DRS1:

- 1994/1995 – Implantação da Célula Inicial em etapa única;
- 1997 – Implantação das Células 1 e 2 em etapa única;
- 1998 – Implantação das Célula 3 em etapa única;
- 1999 – Implantação das Células 4 e 5 em etapa única;
- 2000 – Implantação das Célula 6 em etapa única;
- 2003 – Implantação das Célula 7 em etapa única;
- 2004-2006 – Alçamento a jusante dos diques periféricos das células existentes;
- 2006/2007 – Implantação das Célula Sul em etapa única;
- 2009/2010 – Implantação da Célula Leste 1 (CL1) em etapa única;
- 2009/2010 – Implantação das Bacias de Controle BC3 e BC4;
- 2010 – Implantação da Célula Leste 2 (CL2) em etapa única;
- 2011/2012 – Implantação da Célula Leste 3 (CL3) em etapa única;
- 2012 – Implantação das Bacias de Controle BC5 e BC6;
- 2019 – Implantação do Acesso Externo à Célula Leste 3 (CL3).



Figura 5.1 – Identificação das células e bacias de contribuição do DRS1 (Pimenta de Avila, 2021).

A partir de 2003, com o projeto de implantação da célula 7, a PIMENTA DE AVILA assumiu a função de projetista do DRS1, responsabilizando-se pela elaboração dos projetos posteriores a esta data. Acrescenta-se que a nomenclatura “DRS1” passou a ser utilizada após a implantação da Célula Sul. Anteriormente, o depósito era referido como “DRS – Área 54A”.

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
AVALIAÇÃO DO PROJETO DE REVESTIMENTO E MONITORAMENTO DOS TALUDES		

5.1 LOCALIZAÇÃO

Localizados no município de Barcarena, no estado do Pará, o sistema de disposição de resíduos pertencente à ALUNORTE é composto pelos Depósitos de Resíduos Sólidos DRS1 e DRS2 e situa-se em torno das coordenadas UTM/DATUM SIRGAS 2000 754.812 E 9.828.482 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.

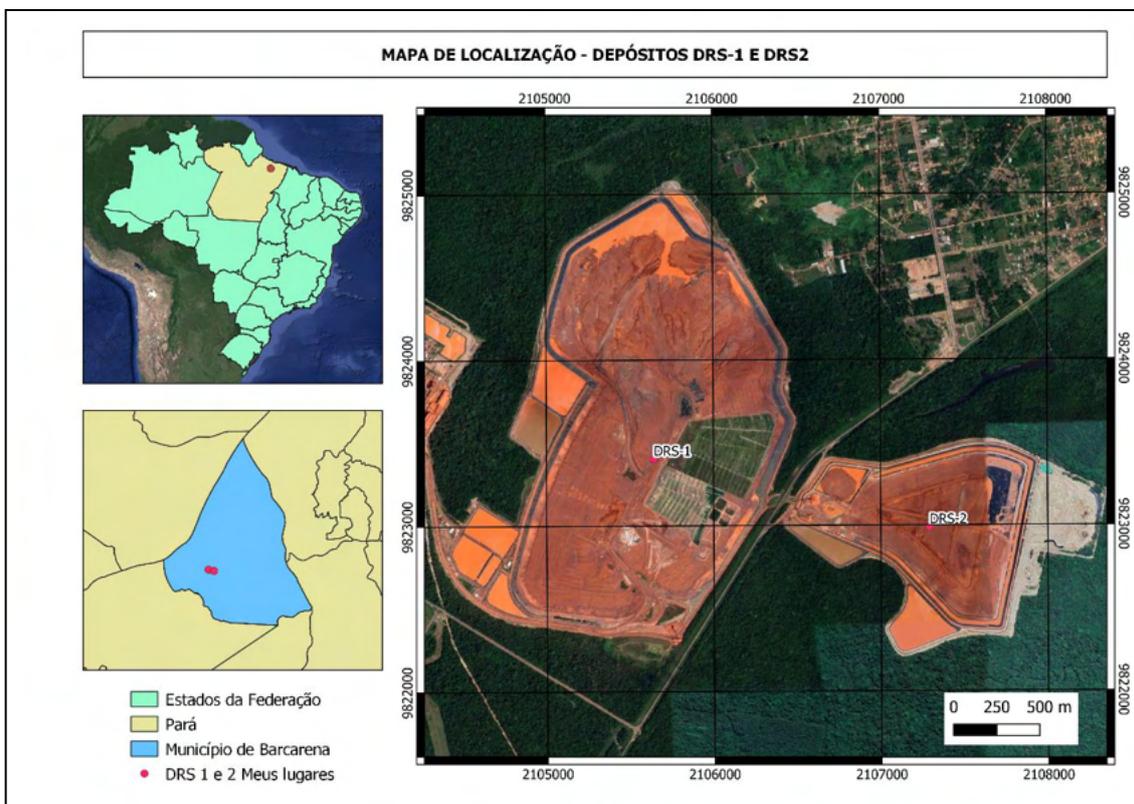


Figura 5.2 – Localização da Estrutura – DRS1 e DRS2

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, identificam-se as comunidades Água Verde, Boa Vista, Bom Futuro, Itupanema, J. Cabanos, J. Independência, J. Paraíso, Jardim das Palmeiras, Laranjal, Murucupi, Nazaré, Nossa Sra. De Fátima, Novo Horizonte, Novo Paraíso, Pioneiro, Renascer com Cristo, São José, Vila

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
AVALIAÇÃO DO PROJETO DE REVESTIMENTO E MONITORAMENTO DOS TALUDES		

Nova e Vila São Francisco. Além das comunidades Quilombolas Gibrié de São Lourenço, Sítio Conceição, Sítio Cupuaçu/Boa Vista, Sítio do Burajuba e Sítio São João.

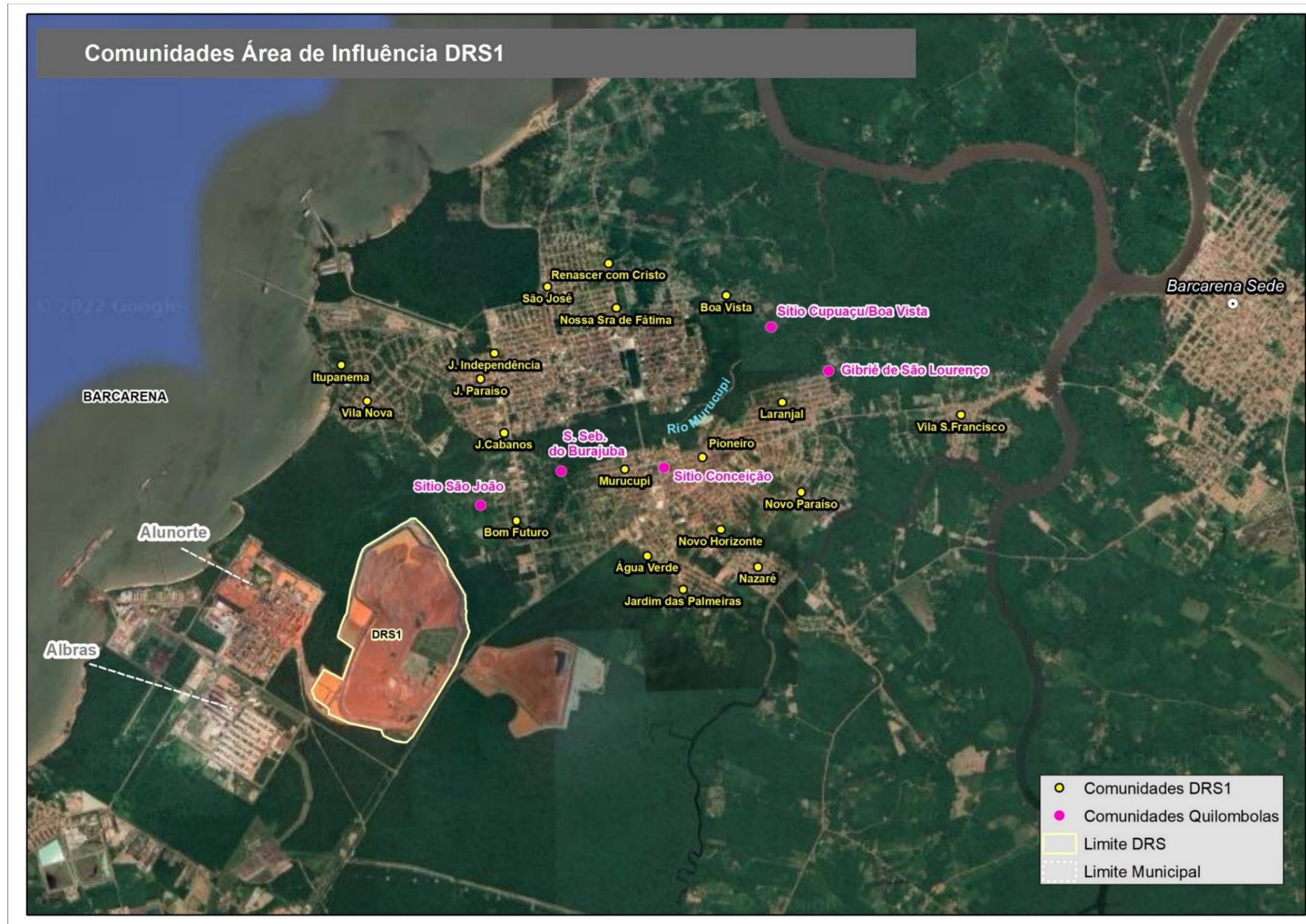


Figura 5.3 – Localização das comunidades próximas aos depósitos DRS1 e DRS2 (Imagem fornecida pela equipe técnica da HYDRO/ALUNORTE)

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
AVALIAÇÃO DO PROJETO DE REVESTIMENTO E MONITORAMENTO DOS TALUDES		

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 DO PROJETO DE REVESTIMENTO E MONITORAMENTO DOS TALUDES

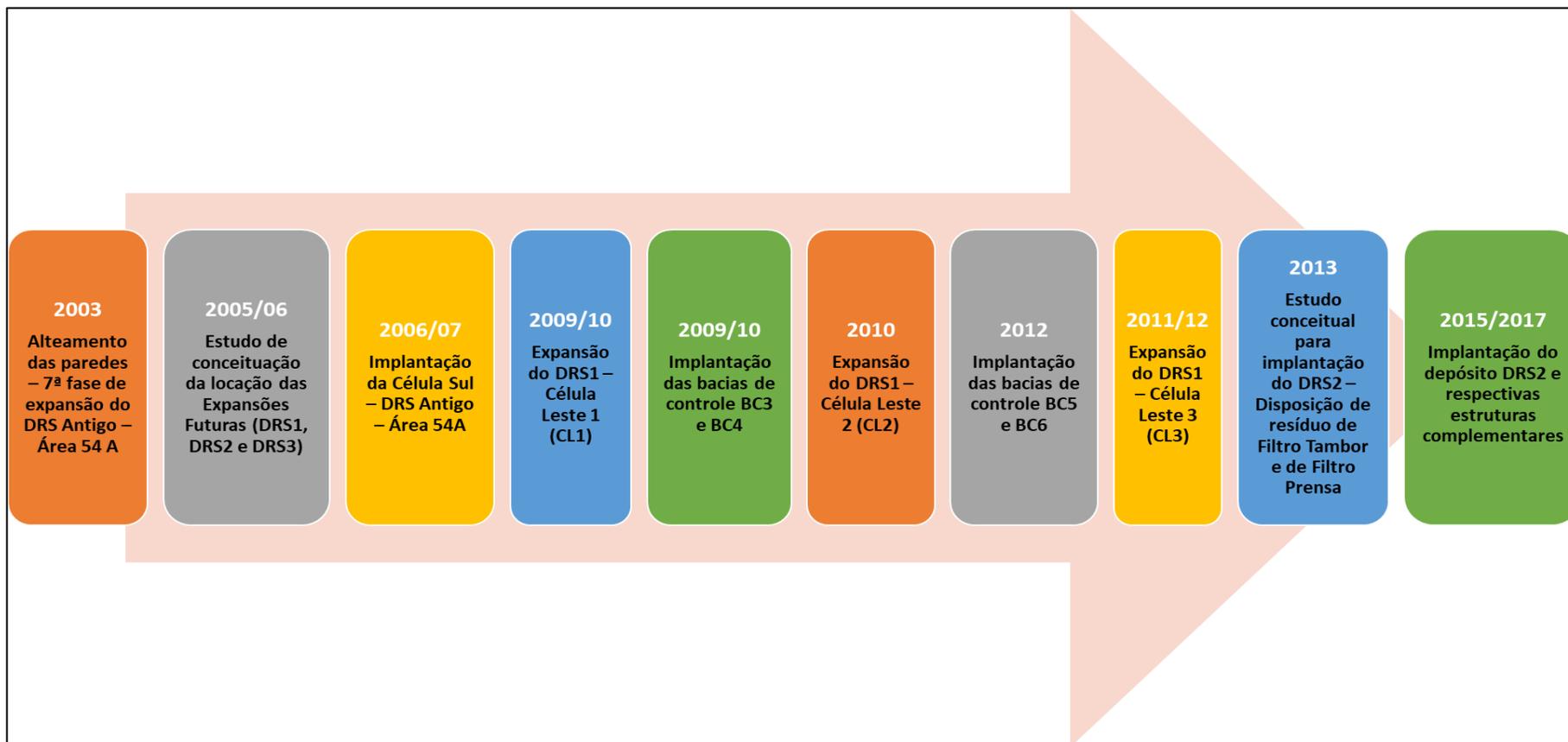


Figura 5.4 – Histórico de expansão do DRS1 e DRS2

5.2 ASPECTOS GEOLÓGICOS

A área de estudo encontra-se inserida no contexto geológico dos sedimentos cenozóicos (< 65,5 milhões de anos) individualizados nas formações: Pirabas e Barreiras, além de 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 DRS1 encontra-se sobre Sedimentos Pós-Barreiras.

Ocupando uma área de aproximadamente 12000 m², que se estende desde a 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, 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.

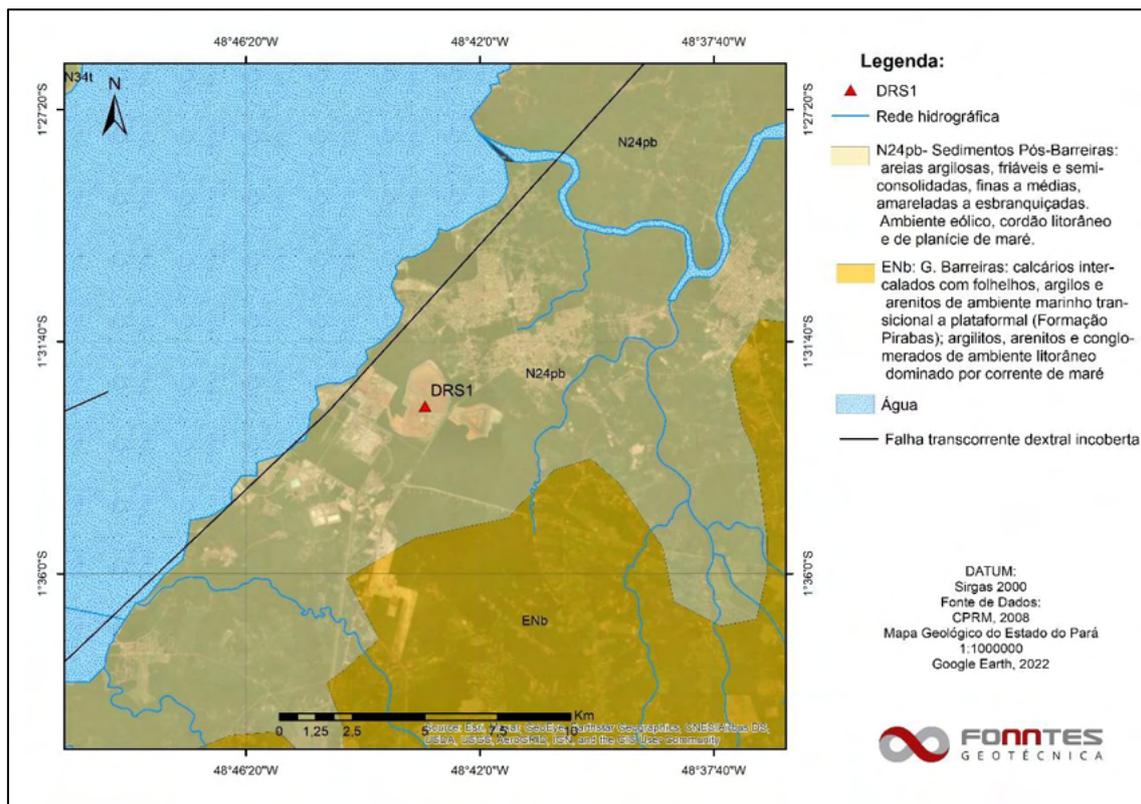


Figura 5.5 – Mapa geológico regional da estrutura DRS1

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.

AVALIAÇÃO DO PROJETO DE REVESTIMENTO E MONITORAMENTO DOS TALUDES
5.2.1 Histórico de Investigações

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 DRS1

CAMPANHA	EMPRESA	ANO	DOCUMENTO
Alteamento das Paredes – 7ª Fase de Expansão – 2003	WS – Geotecnia Ltda	2003	Documento 085/2003
Alteamento das Paredes – 7ª Fase de Expansão – 2003	Geolabor	2003	TLF-2881/0
Projeto de Alteamento da Parede Oeste – Área	WS – Geotecnia Ltda.	2005	Desenho D1-3540-54-G-090
Projeto do Dique de Partida – Célula Sul	Solotécnica Engenharia Ltda.	2006	Documento 073/2006
Expansão do DRS para Leste – CL1/CL2/CL3 – 1ª Etapa	WS-Geotecnia Ltda.	2008	Desenho D1-3540-54-G-093 e documento MD-3540-54- G-091
Expansão do DRS para Leste – CL1/CL2/CL3 – 2ª Etapa	WS-Geotecnia Ltda.	2010	Desenhos D1-3540-54-G-023 a D1-3540-54-G-025 (planta e seções)
Acesso DRS1-DRS2, área de filtragem, desvio e travessia da PA-481	Solotécnica	2014	Documento RT-3541-34-L- 016 e desenhos D1-3541-54- L-008 a D1-3541-54-L-015.
Estudos Geológicos da Fundação – Correia C-34e-04	GEONORT	2015	Documento nº 019/2016
Acesso Externo à CL3	Enviro-Tec	2019	Boletins referentes ao contrato referente ao contrato 4600006593-TAC4 e desenhos D1-3540-54-G- 601 a D1-3540-54-G-603
Instrumentação Complementar – 2019/2020	3Geo Consultoria	2019/2020	Relatório RT-467309-54G- 003
Caracterização dos materiais do reservatório	Fugro In Situ Geotecnia Ltda	2021	RT-468603-54-L-0002 R00, RT-468603-54-L-0003 R00 e RT-468603-54-L-0004 R00

5.2.2 Geologia Local

Nesse subitem é apresentada uma síntese do estudo de geologia local desenvolvido no relatório técnico do projeto “As Is”, doc. RT-3540-54-G-1014, elaborado pela empresa PIMENTA DE ÁVILA.

AVALIAÇÃO DO PROJETO DE REVESTIMENTO E MONITORAMENTO DOS TALUDES

A estrutura DRS1 encontra-se sobre fundação que varia entre materiais predominantemente argilosos a arenosos, com coloração variegada e pontualmente é possível observar a presença de pedregulhos. A camada inferior é caracterizada por apresentar composição silto arenosa a silto argilosa e NSPT variando entre 13 e 35, sendo a média igual a 20. A camada superior apresenta predominantemente material de composição arenosa, com ocorrências de silte e argila. O índice de NSPT varia entre 20 e 34 e o valor médio encontrado é igual a 25.

Na região de jusante do canal de contorno da estrutura, é possível observar a ocorrência de materiais de bota fora, e próximo à estaca 275 ocorrem detritos vegetais e resíduos, de coloração cinza escura e índice de NSPT inferior a 5 golpes.

O aterro é formado por solos argilo-siltosos a silto-arenosos com coloração variegada. Pontualmente é observada a presença de pedregulhos que interferem nos resultados do NSPT, sendo o valor mínimo de NSPT observado igual a 5 e o máximo igual a 54.

A Figura 5.6 apresenta a seção típica que representa a área de interesse.

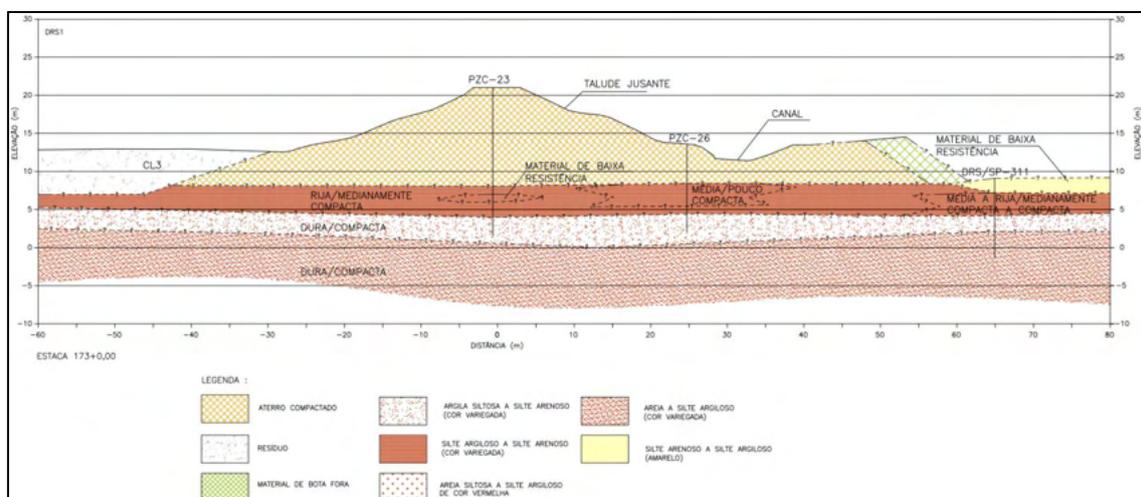


Figura 5.6 – Seção típica da área de estudo. (Fonte: RT-3540-54-G-1014)

5.3 DRENAGEM INTERNA

Os diques do DRS1, bem como todo o reservatório, os canais de contorno e as bacias de controle, são revestidos com geomembrana PEAD, com espessuras de 1,0 mm e 1,5 mm, variando conforme o ponto de instalação do material. Sendo assim, os diques não apresentam sistema de drenagem interna por serem impermeabilizados.

Os relatórios FG-2201-NHB-A-BA-RT11-01 e FG-2201-NHB-A-BA-RT21-01, referentes aos itens N e O do termo de referência do TAC 3.1, trazem com maior detalhamento avaliação quanto ao material utilizado na impermeabilização dos depósitos e suas características mecânicas de resistência.

5.4 SISTEMA EXTRAVASOR E DRENAGEM SUPERFICIAL

Conforme indicado no doc. RT-3540-54-G-570-R01, elaborado pela PIMENTA DE AVILA (2021), o sistema extravasor do DRS1 é composto por 40 rápidos de concreto localizados nos diques periféricos do DRS1. Os rápidos direcionam os efluentes do reservatório do depósito e as águas superficiais para os canais de contorno. Na sequência, o fluxo é encaminhado para as bacias de controle, que armazenam e direcionam os efluentes do sistema para a Estação de Tratamento de Efluentes Industriais ETEI.

Os canais de contorno circundam todo o depósito DRS1 e são divididos em canal norte, sul, leste, oeste e canal CL3. As bacias de controle do depósito são denominadas BC1, BC2, BC3, BC5 e BC6.

5.5 INSTRUMENTAÇÃO

Segundo o doc. RT-3540-54-G-570-R01, elaborado pela PIMENTA DE AVILA (2021), os diques do depósito DRS1 conta com uma série de instrumentos para monitoramento geotécnico, incluindo 35 piezômetros Casagrande, 21 medidores de nível d'água, 113 marcos superficiais, 31 poços de monitoramento. Os níveis das bacias de controle são registrados por meio de réguas limnimétricas.

Além disso, as pilhas de resíduos contam com 43 piezômetros elétricos de corda vibrante e oito poços de monitoramento e os aterros experimentais possuem um total de 24 piezômetros elétricos, 24 marcos superficiais, 9 poços de monitoramento e medidores de vazão.

5.6 FECHAMENTO DO DEPÓSITO DRS1

O “Manual de Planejamento de Implantação e Operação” relativo ao Projeto de Reabilitação do DRS1, elaborado pela LPS em 14/12/18, doc. OM-8400-54-G-069 R01, apresenta a reabilitação do DRS1. Este processo engloba:

- uma camada de conformação com resíduo filtro prensa densificado assente sobre perfil estabilizado da superfície do depósito;
- uma camada de areia ou geossintético drenante de bloqueio/ sistema de drenagem subsuperficial;
- duas camadas de solo, sendo a primeira de cobertura com solo local com espessura média de 60cm e a segunda camada de solo vegetal com 20cm de espessura;
- sistema de drenagem superficial definitivo, destinado à captação e coleta dos escoamentos de água de chuva e posterior encaminhamento para os canais periféricos limpos a serem construídos;
- sistema de drenagem subsuperficial robusto em cascalho e tubos drenantes na região do buffer, que se apoia sobre geotêxtil tecido sobre resíduo escavado e é sobreposta por uma camada de cobertura final de geotêxtil não tecido e geomembrana de PEAD.

A reabilitação prevista contempla 11 faixas entre o topo do depósito e a crista do dique periférico, conforme pode ser observado na Figura 5.7. A reabilitação foi iniciada pela Faixa 2, localizada no Setor Sul (Faixa 1 a 4), cujo término de operação ocorreu em 2009.

AValiação DO PROJETO DE REVESTIMENTO E MONITORAMENTO DOS TALUDES

Na sequência, será realizada a reabilitação do Setor Norte (Faixas 5 e 6), cujo término de operação foi em 2007. Após o preenchimento da Faixa 6, será realizado o preenchimento horizontal da CL3, iniciando desde o fundo da célula até a cota 20,00 m e prosseguindo, ainda horizontalmente, no trecho sobre a área da CL3 para conformar os taludes, em forma de cone, até que seja atingida a cota do platô. As fases finais de reabilitação comportam as faixas 7, 8, 9, 10 e 11, sendo as faixas 7 e 8 executadas em trecho de transição para as áreas de reabilitação sobre a CL3, já preenchida e conformada em taludes.

O projeto prevê a implantação da camada de conformação em faixas do topo até a crista de dique de partida, de forma a evitar erosões e retrabalhos. Estes sub-trechos (faixas) possuem largura variável, conforme volume de destinação de resíduo de filtro prensa ao DRS1 por ano.

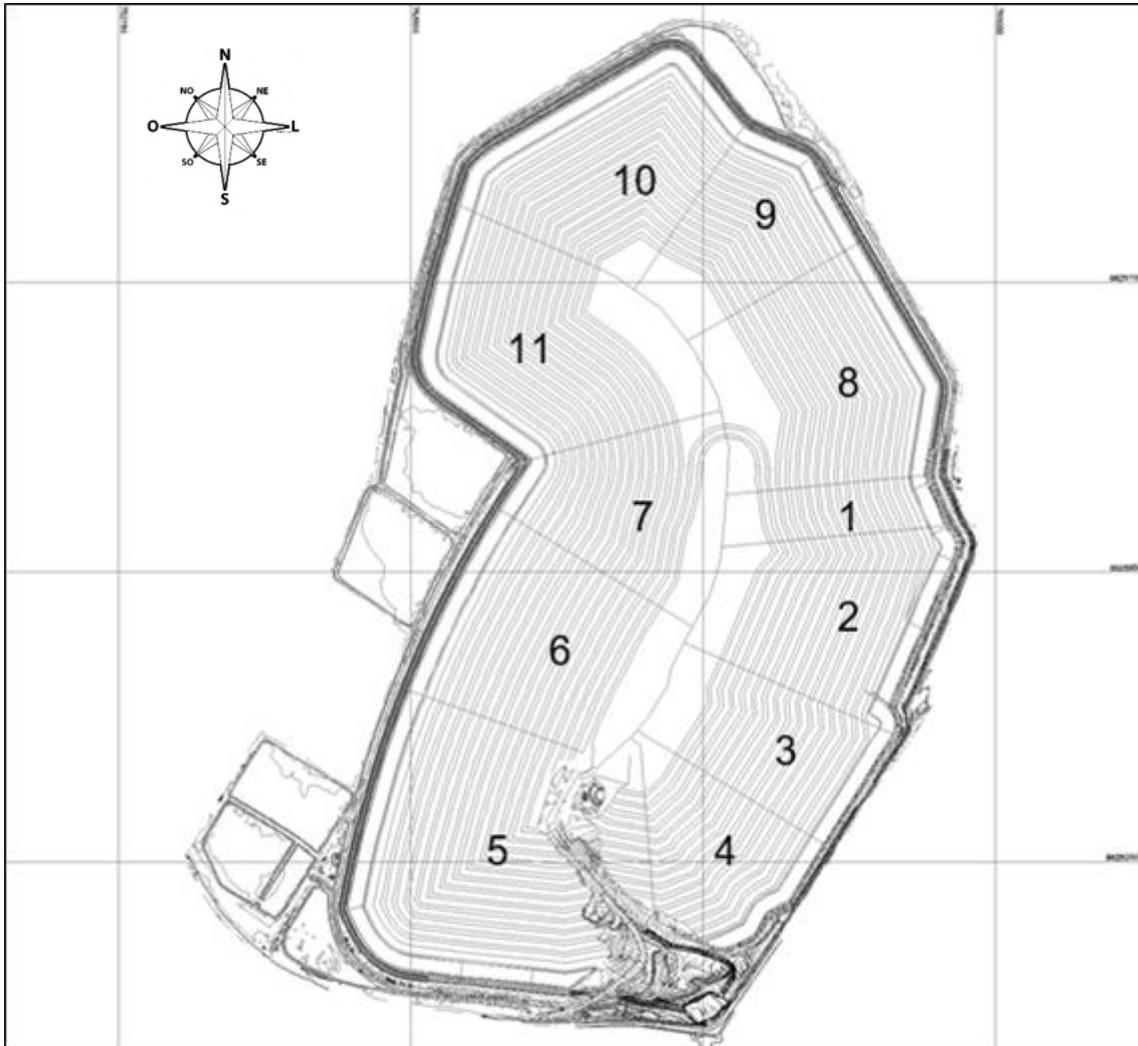


Figura 5.7 – Faixas de reabilitação do DRS1 (Doc. OM-8400-54-G-069 R01)

A Figura 5.8 apresenta a situação da FAIXA 2 (Vide Figura 5.7), em processo reabilitação, durante visita técnica de campo realizada pela FONNTES no dia 09/02/2022.



Figura 5.8 – Vista da FAIXA 2 no DRS1 em processo de reabilitação (Fonte: Visita Técnica realizada em 09/02/2022)

O projeto pressupõe que após o término da reabilitação de cada faixa, inclusa área de buffer, todo deflúvio seguira para caixa de passagem instrumentada, estando dentro dos parâmetros físico químicos CONAMA, seguirão através de uma comporta automática para uma segunda caixa onde os parâmetros definidos são novamente medidos e confirmando a conformidade poderão ser enviados ao corpo receptor, meio ambiente (após licença da SEMAS), em qualquer situação de desvio serão lançados no canal periférico que segue para tratamento na estação de tratamento de efluentes.

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

AVALIAÇÃO DO PROJETO DE REVESTIMENTO E MONITORAMENTO DOS TALUDES

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 L)**, objeto desse relatório, é reproduzida a seguir.

O projeto do revestimento de impermeabilização, geomembrana de PEAD, será avaliado com maiores detalhes no Item A), que corresponde ao estudo dos projetos como um todo. O controle tecnológico da execução das geomembranas de PEAD com ensaios de campo e laboratórios serão verificados no Item O). O monitoramento dos taludes será abordado com maiores detalhes na Item D), que é exclusivo sobre instrumentação e monitoramento.

No entanto, o texto do ofício foi escrito na fase inicial de elaboração dos relatórios da TAC 3.1 e a emissão da revisão inicial do presente relatório consistiu no 22º relatório emitidos pela FONNTES em um total de 29 relatórios. De modo a abordar os itens considerados mais relevantes para tratar o item L), fez-se necessário o ajuste dos itens de referência para a elaboração do presente relatório. Portanto, para atendimento desse item, será abordado o item N) ao invés do item A), ou seja, no presente relatório serão abordados sucintamente os seguintes itens que se referem a revestimento e monitoramento dos taludes:

- d) Análise qualitativa de instrumentação com vistas a determinação da densidade de drenagem, a fim de aferir o comprometimento das águas superficiais e subterrâneas, documento FG-2201-NHB-A-BA-RT07-01, emitido pela FONNTES em fevereiro de 2023;
- o) Interpretação dos ensaios destrutivos e não destrutivos para verificação da estanqueidade da Geomembrana, documento FG-2201-NHB-A-BA-RT11-01, emitido pela FONNTES em março de 2023;

- n) Interpretação dos resultados dos testes relativos à aplicação do material sobre as geomembranas, documento FG-2201-NHB-A-BA-RT21-01, emitido pela FONNTES em março de 2023.

7. DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO

Tendo em vista que a avaliação do projeto de revestimento e monitoramento dos taludes do DRS1 foi abordada nas letras “D”, “N” e “O” da TAC 3.1, neste item serão apresentados, de forma sucinta, os estudos desenvolvidos nos demais relatórios, bem como suas principais conclusões.

7.1 AVALIAÇÃO DA DENSIDADE DE DRENAGEM DO DRS1

7.1.1 Desenvolvimento do Estudo

Conforme indicado no Manual de Operação, elaborado pela PIMENTA DE AVILA, em 05/03/21, doc. OM-3540-54-G-1001 R03, o monitoramento geotécnico dos diques do depósito DRS1 é composto por: 21 medidores de nível d’água, 35 piezômetros Casagrande, 127 marcos superficiais e 31 poços de monitoramento. Também é realizada o controle do nível d’água das bacias de controle e do efluente acumulado na CL3, através da leitura de régua limnimétrica cadastradas junto com o apoio da equipe de topografia, e o registro diário de pluviometria, através de uma estação meteorológica instalada próximo à BC2.

Os dados de cadastro dos medidores de nível d’água, piezômetros, marcos superficiais e poços de monitoramento dos diques do depósito DRS1 foram apresentados no documento FG-2201-NHB-A-BA-RT07-01, Relatório Técnico de Avaliação da Densidade de Drenagem do DRS1, elaborado pela FONNTES em abril de 2022.

AVALIAÇÃO DO PROJETO DE REVESTIMENTO E MONITORAMENTO DOS TALUDES

Para Avaliação da Densidade de Drenagem do DRS1, a FONNTES avaliou o Monitoramento da Estabilidade Física da Estrutura, analisando a frequência de realização da leitura e os níveis dos instrumentos. De maneira sucinta foram apresentadas as leituras registradas em cada seção de monitoramento e a opinião desse auditor em relação a posição da superfície freática/piezométrica, em relação ao que seria esperado para operação da estrutura. Importante lembrar que todo o DRS1 é impermeabilizado com geomembrana de PEAD, assim o esperado operacionalmente é que todos os instrumentos no maciço do Dique de Contorno registrem leitura seca, e exista uma superfície freática/piezométrica na fundação apenas. Os instrumentos localizados dentro do resíduo devem registrar uma superfície freática/piezométrica diferente daquela lida nos instrumentos externos, garantindo que não exista contato entre a água contida no resíduo e a água natural externa a estrutura.

No documento FG-2201-NHB-A-BA-RT07-01, também foi apresentada uma breve descrição das bacias de controle e a capacidade instalada de bombeamento em cada uma delas, segundo o Manual de Operação de disposição de resíduo de filtro prensa no DRS1 (documento OM-3540-54-G-1001).

Conforme avaliado no documento FG-2201-NHB-A-BA-RT07-01, para operação do sistema de bombeamento das bacias de controle, a Alunorte utiliza como critério de monitoramento, o valor em percentual, definido pela relação entre a altura do nível de água e a altura total de cada reservatório. O documento FG-2201-NHB-A-BA-RT07-01 apresentou a classificação dos níveis de risco de falha do sistema, sendo estes 3 níveis de controle, associados ao nível de água máximo atingido durante as simulações, em função da existência de uma borda livre remanescente mínima de 0,5 m.

Outro aspecto da densidade de drenagem avaliado foi o monitoramento de poços ambientais, no total 31 poços de monitoramento do nível freático próximos ao DRS1 no terreno natural a jusante da estrutura. Foi analisado o histórico da elevação do nível

d'água observado em todos os poços. Como conclusão verificou-se uma tendência de decréscimo gradual entre os meses de outubro e novembro, seguido de um leve acréscimo ou estabilização nas leituras durante o mês de dezembro.

Como a análise apenas do nível freático não é capaz de indicar se ocorre contaminação devido a falha do sistema de impermeabilização, no documento FG-2201-NHB-A-BA-RT07 foi realizada também a avaliação do monitoramento da qualidade das águas subterrâneas por meio de seis poços ao redor do DRS1. Nestes poços são monitorados os parâmetros: Sólidos Totais Dissolvidos, Nitrato, Coliformes Termotolerantes, Turbidez, além da medição de nível de água. Parâmetros estes que foram estabelecidos na condicionante da Licença de Operação da ALUNORTE e que são reportados periodicamente à SEMAS/PA.

7.1.2 Considerações do Estudo

Neste item são apresentadas as considerações realizadas no documento FG-2201-NHB-A-BA-RT07-01, Relatório Técnico de Avaliação da Densidade de Drenagem do DRS1, elaborado pela FONNTES em abril de 2022.

7.1.2.1 Monitoramento da Estabilidade Física

A avaliação dos medidores de nível d'água, piezômetros, poços de monitoramento e nível d'água das Bacias de Controle se baseou no Relatório Técnico de Avaliação Periódica dos Resultados de Monitoramento da Instrumentação referente a outubro a dezembro/2021, elaborado pela PIMENTA DE AVILA (2022), doc. RT-3540-54-G-581 e no Relatório de Acompanhamento da Instrumentação da Linha freática referente a novembro e dezembro/2021, elaborado pela LPS (2022). Também, foi analisado o banco de dados de leitura dos instrumentos disponibilizados pela ALUNORTE, em fevereiro/2022, nos arquivos "Níveis, Bordas Livres e Elevação das Bacias DRS1_DRS2_82F_2021" e "NK03.01 - PM01-R0 - DRS1". Além disso, foram utilizadas

AVALIAÇÃO DO PROJETO DE REVESTIMENTO E MONITORAMENTO DOS TALUDES

informações do relatório da Inspeção de Segurança Regular do DRS1 (documento RT-469137-54-G-0003 DRS1 RISR 2021.2) e do monitoramento da qualidade das águas subterrâneas do DRS1 e DRS2 (respectivamente documentos “Resultados Hydro Alunorte 2021 a 2022-DRS1-condicionante” e “Resultados Hydro Alunorte 2021 a 2022 DRS2”).

Com base na avaliação dos documentos supracitados, verifica-se que a densidade de instrumentação para monitoramento do nível freático / piezométrico do Depósito DRS1 é adequado e suficiente para avaliar a capacidade da Geomembrana PEAD em impermeabilizar o contato do depósito, dos diques, dos canais e das bacias com o terreno natural.

Em relação aos instrumentos de monitoramento do nível freático / piezométrico dos diques de controle, observa-se que, de modo geral, os MNA's e PZ's instalados acima da cota do terreno apresentam leituras secas, ou seja, o nível freático / piezométrico se encontra mais profundo do que a cota de fundo dos instrumentos. Além disso, observa-se que o nível d'água nos poços de monitoramento localizados a jusante do Dique de Contorno apresentam variações em suas leituras coerentes com as leituras dos piezômetros mais profundos, instalados na fundação do Dique de Contorno. Essas diferenças verificadas entre o nível freático / piezométrico dos instrumentos instalados acima e abaixo da geomembrana PEAD, indicam a eficiência da Geomembrana PEAD que impermeabilizar os diques, os canais e as bacias.

Além disso, ao comparar as seções do Dique de Contorno com as seções traçadas no interior do depósito DRS1 (LPS, 2022, doc. RT-8400-54-G-180), verifica-se que o nível d'água se encontra consideravelmente mais elevado no interior do depósito e nas Bacias de Contorno do que no maciço do Dique de Contorno. Com isso, é possível verificar que há estanqueidade da Geomembrana PEAD que impermeabiliza os diques, os canais e as bacias.

Vale ressaltar que os instrumentos PZC-15, PZC-17 e MNA-21 da Seção D apresentaram leituras no interior do maciço. No entanto, os piezômetros instalados na fundação (PZC-13 e PZC-16) apresentaram leituras aproximadamente 4,0 m abaixo destes instrumentos. Para avaliação das leituras dos instrumentos PZC-15, PZC-17 e MNA-21, a PIMENTA DE AVILA solicitou a coleta de amostras de efluente no interior dos instrumentos, no canal de contorno e na CL3 para aferição do pH, a abertura de janelas na geomembrana nas proximidades do MNA-21, testes de secagem dos instrumentos e furos a trado nas proximidades do MNA-21. A partir desta avaliação, a PIMENTA DE AVILA concluiu que: o nível d'água observado nos furos de trado e o nível piezométrico dos instrumentos indicam a existência de uma continuidade lateral, aproximadamente na interface aterro-fundação e entre as estacas 120 e 144; não há contribuição do reservatório da CL3 e dos efluentes do canal de contorno para o nível d'água identificado no dique; e a umidade dos instrumentos não se estende para jusante. Destaca-se que esta situação está sendo monitorada pela ALUNORTE e acompanhada pela PIMENTA DE AVILA.

7.1.2.2 Monitoramento das Bacias

Em relação às bacias de controle, estas são monitoradas por régua limnimétrica lida manualmente em cada turno, e seu bombeamento obedece a um procedimento operacional baseado em níveis de controle adotados em função da diferença percentual entre a crista dos reservatórios e o nível d'água atingido com cada evento de precipitação simulado. Durante a visita técnica também pôde ser visto que os canais de contorno e as bacias são monitoradas por câmeras. É possível concluir que o monitoramento do nível das bacias de controle está adequado.

De acordo com o Manual Operacional (PIMENTA DE ÁVILA, 2021, documento OM-3540-54-G-1001), existem pontos de transbordos para regiões internas ao DRS1, portanto, na hipótese de cheias decamilenares, alguns acessos de serviços apresentam potencial de

serem alagados. Ressalta-se que os acessos potencialmente alagáveis se localizam dentro da área do DRS1, áreas que são impermeabilizadas. O Manual Operacional acrescenta que em termos de segurança hidráulica e ambiental, não ocorrem transbordos para o meio ambiente.

7.1.2.3 Considerações Sobre a Densidade de Instrumentação

Em relação a densidade de instrumentos para monitoramento do nível freático / piezométrico, verifica-se que o Dique de Contorno do DRS1 apresenta dez seções instrumentadas, incluindo 21 medidores de nível d'água, 35 piezômetros, 113 marcos superficiais, 31 poços de monitoramento e medidores de nível nas bacias de controle e no CL3. Além disso, o interior do Depósito DRS1 também é monitorado através de oito seções instrumentadas, incluindo 43 piezômetros elétricos de corda vibrante e 08 poços de monitoramento.

Com base na quantidade de instrumentos, locação das seções e interpretação das leituras dos instrumentos, conclui-se que a densidade de instrumentação no Depósito DRS1 é adequada. A exceção está na região sul do Dique de Contorno, onde o monitoramento é realizado exclusivamente por marcos superficiais. Não há nessa região um monitoramento do Dique de Contorno realizado por INA's e PZ's como em outras regiões da estrutura. Essa questão foi levantada junto da HYDRO e ALUNORTE em reuniões técnicas, que justificou essa questão pelo fato dessa ser a região mais antiga do depósito, onde os resíduos já estão consolidados e não há incremento de umidade por não existir mais disposição, além de nunca ter sido uma região de acúmulo de água no histórico operacional do depósito. Assim, o parâmetro de maior relevância a ser monitorado são as deformações. Esse auditor concorda com a posição e justificativa da ALUNORTE.

Entretanto, acrescenta que seria uma boa prática adicionar 1 ou 2 seções de monitoramento do maciço e da fundação nessa região da estrutura com INA's e PZ's, no

mesmo padrão das demais regiões que já são monitoradas, especialmente onde o Dique de Contorno que faz fronteira com as Bacias BC-03 e RC-01. É fato que se a geomembrana que impermeabiliza essas bacias falhar os poços ambientais PM-128 e PM-108 irão detectar. Entretanto, se ocorrer uma falha da geomembrana em direção do Dique de Contorno com uma seção monitoramento nessa região seria mais rápida a percepção. De maneira similar, se ocorrer uma falha da geomembrana que impermeabiliza o próprio depósito, a seção monitorada também seria de grande valia nessa detecção.

Em relação à frequência que as leituras são realizadas foi possível concluir como adequadas. A prática de governança em submeter os dados de instrumentação ao crivo de uma consultoria externa é extremamente relevante e constitui uma boa prática de engenharia, saudável para a operação e monitoramento, pois permite que uma empresa externa ao ambiente operacional avalie o desempenho da estrutura e realize recomendações de melhorias.

7.1.2.4 Monitoramento dos Poços Ambientais

Em relação ao monitoramento das águas subterrâneas, entende-se que a distribuição dos poços e frequência de medições está adequada para a finalidade de monitoramento da qualidade das águas subterrâneas. Destaca-se que os parâmetros analisados e o número de poços são aqueles estabelecidos na condicionante da Licença de Operação da ALUNORTE, analisados por especialista da área ambiental e reportados ao órgão fiscalizador. Entretanto, caso sejam identificados valores atípicos em alguns dos poços, a malha de monitoramento poderá ser complementada.

Ademais, recomenda-se que sejam avaliados todos os parâmetros da lista completa do art. 34 da resolução CONAMA 396/2008, no mesmo padrão que já é feito no DRS2 por iniciativa da própria ALUNORTE. Ademais, recomenda-se que assim como ocorre a avaliação periódica dos resultados de monitoramento da Instrumentação

trimestralmente, seja realizada avaliação por especialistas internos ou externos à HYDRO, ALUNORTE dos parâmetros de qualidade das águas subterrâneas, para detectar possíveis anomalias.

7.2 INTERPRETAÇÃO DE TESTES RELATIVOS À APLICAÇÃO DE MATERIAIS SOBRE A GEOMEMBRANA

7.2.1 Desenvolvimento do Estudo

O documento FG-2201-NHB-A-BA-RT21-01, emitido pela FONNTES em 17/03/2023, avaliou a escolha da geomembrana para o DRS1 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.

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 relatório técnico do projeto executivo da CL3 (documento RT-3540-54-G-016), toda a CL3 é revestida com geomembrana PEAD.

Nos taludes de montante, em contato com os resíduos essa proteção foi realizada por meio de geotêxtil de 400g/m². Nos taludes de jusante, que não há contato com os

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
AVALIAÇÃO DO PROJETO DE REVESTIMENTO E MONITORAMENTO DOS TALUDES		

resíduos, foi projetado uma geomembrana PEAD 1,0 mm visando prevenir processos erosivos sobre o talude.

As propriedades da geomembrana PEAD utilizadas na célula 3 (CL3) do DRS1 foram apresentadas na Especificação Técnica de recebimento, aceitação e instalação do sistema de impermeabilização da CL3 (documento ES-3540-54-G-222).

7.2.2 Considerações sobre a aplicação de materiais sobre a geomembrana

De acordo com o documento FG-2201-NHB-A-BA-RT21-01, emitido pela FONNTES em 17/03/2023, após verificação das propriedades da geomembrana e geotêxtil utilizado, foi possível realizar uma verificação de sua adequabilidade. Para tanto, foram utilizados parâmetros disponíveis no projeto e aplicada a metodologia de dimensionamento 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 DRS 1 irá exercer ao final de sua implantação para as células CL 1, 2 e 3, lembrando que sob os resíduos é utilizada geomembrana de 1,5mm de espessura. Além disso, no documento FG-2201-NHB-A-BA-RT21-01 também foi identificado que a gramatura do geotêxtil de proteção ao punctionamento está dimensionada de forma conservadora e a vala de ancoragem da geomembrana está adequada.

Conforme apresentado no documento FG-2201-NHB-A-BA-RT21-01, as células mais antigas (Célula Inicial, Célula 1 a Célula 7 e Célula Sul) não dispunham de alguns dados essenciais para revisão dos testes relativos à aplicação dos materiais sobre a geomembrana, por isso, o estudo realizado no documento foi concentrado naquelas células que dispunham de dados (CL 1, 2 e 3). Entretanto, o que é possível afirmar é que o carregamento exercido pelos resíduos do DRS 1 pode ser considerado baixo (altura de

resíduo de 44,85m) para os padrões de resistência típicos de geomembranas comerciais. Se as fundações tiverem recalques similares aqueles calculados DRS 2 (premissa muito conservadora) as geomembranas antigas estarão com boa performance. Uma avaliação indireta de eventual mal funcionamento da camada impermeabilizante ocorre por meio dos poços de monitoramento de águas superficiais e subterrâneas. Essa avaliação foi apresentada com detalhes no relatório FG-2201-NHB-RT07, que compreende a letra D do TAC 3.1.

Por fim, pode-se afirmar que para as células cujos cálculos foram verificados, foi possível concluir que o dimensionamento proposto em projeto está adequado.

7.3 INTERPRETAÇÃO DOS ENSAIOS PARA VERIFICAÇÃO DA ESTANQUEIDADE DA GEOMEMBRANA

7.3.1 Desenvolvimento do Estudo

No documento FG-2201-NHB-A-BA-RT11-01, emitido pela FONNTES em março de 2023, foram avaliados os boletins de campo dos ensaios que atestaram a qualidade, integridade e estanqueidade da geomembrana durante a sua instalação no Depósito DRS1. Se foram aplicadas as melhores práticas de engenharia e executados os ensaios de controle conforme critérios consagrados de engenharia e na frequência recomendada.

Também foram verificados os ensaios de laboratório disponibilizados, conduzidos para avaliação da qualidade da geomembrana fornecida conforme critérios técnicos do catálogo do fabricante e do projeto. 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.

AVALIAÇÃO DO PROJETO DE REVESTIMENTO E MONITORAMENTO DOS TALUDES

As geomembranas são membranas poliméricas flexíveis que apresentam permeabilidade extremamente baixas (da ordem de 10^{-12} cm/s), indicadas para impermeabilização dos depósitos de resíduo de bauxita, conforme Manual Brasileiro de Geossintéticos (VERTEMATTI, 2015), servindo como barreiras de líquidos e vapores e por consequência protegendo eventuais contaminações do solo e água.

Pelo fato de o DRS1 ser uma estrutura mais antiga, com mais de 30 anos, tendo passado por diferentes normativos de aplicação e controle de qualidade da impermeabilização por geomembrana, o histórico do controle tecnológico de instalação de cada célula construída em diversos períodos apresenta diferentes níveis de detalhe e profundidade. As células mais antigas dispõem de menos registros históricos, tais como documento *As Built*, ensaios destrutivos e não destrutivos, enquanto as células mais novas apresentam com maior nível de detalhes das especificações técnicas do material aplicado e os testes de avaliação da qualidade de soldas e reparos realizados durante a instalação.

Neste sentido, é importante contextualizar e esclarecer que durante toda década de 90 o tema técnico relacionado aos geossintéticos ainda era incipiente no Brasil, principalmente em termos de normatização. No início dos anos 2000 iniciaram os grupos de trabalho da ABNT para publicação das primeiras normas brasileiras relacionadas ao tema. As obras àquela época acabavam por adotar normas de outros países como referência. Ainda hoje, há muito o que ser desenvolvido, tanto em termos de estudos técnicos como normatização no Brasil. Logo, a não existência ou limitação de dados mais antigos em estruturas desse tipo acaba sendo algo comum no Brasil. A eficiência da estanqueidade da geomembrana nesses casos é avaliada de forma indireta, através do acompanhamento da instrumentação e qualidade da água dos poços ambientais.

A primeira norma brasileira que trata de instalação de geomembranas poliméricas foi a ABNT NBR 16.199, válida a partir de agosto de 2013. A mesma norma apresentou sua segunda edição publicada em março de 2020. Antes delas, era comum se usar no Brasil

os padrões internacionais estabelecidos pela *American Society for Testing and Materials*, quais sejam:

- i. ASTM D 4545 (1986) “Standard Practice for Determining the Integrity of Factory Seams Used in Joining Manufactured Flexible Sheet Geomembranes”

Estabelece práticas padrões para determinação da integridade de soldas fabricadas para junção de painéis de geomembranas flexíveis manufaturadas.

- ii. ASTM D 4437 (1999) “Standard Practice for Determining the Integrity of Field Seams Used in Joining Flexible Polymeric Sheet Geomembranes”

Estabelece práticas padrões para determinação da integridade de soldas usadas para junção de painéis de geomembranas poliméricas.

- iii. ASTM D 6392 (1999): “Standard Test Method for Determining the Integrity of Nonreinforced Geomembrane Seams produced using Thermo-Fusion Methods”

Estabelece metodologia de teste padrão para determinação da integridade de soldas de geomembranas não reforçadas pelos métodos de termo fusão.

- iv. ASTM D 6693 (2001): “Standard Test Method for Determining Tensile Properties of Nonreinforced Polyethylene and Nonreinforced Flexible Polypropylene Geomembranes”

Estabelece metodologia de teste padrão para determinação de propriedades de tração de geomembranas de polietileno e polipropileno não reforçadas.

O projeto mais antigo do DRS1 que trata da aplicação de geocélula identificado durante a auditoria é o "Design criteria_Area 54" (doc. CD-BALN-54-P-002), elaborado pela ALCAN INTERNATIONAL LIMITED, em junho de 1984. Este documento definiu critérios iniciais para projetar o depósito de resíduos sólidos provenientes do beneficiamento da bauxita e já instruía que seriam necessários testes com o solo e com os resíduos para

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
AVALIAÇÃO DO PROJETO DE REVESTIMENTO E MONITORAMENTO DOS TALUDES		

avaliar a necessidade de implantação de geomembranas impermeabilizantes sob o as células do DRS1.

Visando consolidar os registros históricos de aplicação de geomembrana sobre cada célula do DRS1 foi elaborada a Tabela 7.1, onde é apresentada a existência dos documentos, data de instalação da geomembrana em cada célula, empresa projetista e empresa executora.

AVALIAÇÃO DO PROJETO DE REVESTIMENTO E MONITORAMENTO DOS TALUDES
Tabela 7.1 – Registros históricos da geomembrana aplicada por célula/expansão do DRS1 identificados durante a elaboração da auditoria

LOCAL	PERÍODO DE INSTALAÇÃO DA GEOMEMBRANA	EXISTÊNCIA DE PROJETO	EXISTÊNCIA DE AS BUILT	ESPECIFICAÇÕES DA GEOMEMBRANA	ENSAIOS DESTRUTIVOS	ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS	EMPRESA PROJETISTA	EMPRESA EXECUTORA
Célula inicial	Janeiro/1994 ¹	Sim	N.I.	Sim ²	N.I.	N.I.	LPS Consultoria e Engenharia	NORSAN Impermeabilização e comércio LTDA
Célula 1 (expansão 1)	1996	Sim	N.I.	Sim ²	N.I.	N.I.	ALUNORTE	N.I.
Célula 2 (expansão 2)	1996	Sim	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	ALUNORTE	N.I.
Célula 3 (expansão 3)	1997	Sim	N.I.	Sim ²	N.I.	N.I.	ALUNORTE	N.I.
Célula 4 (expansão 4)	1998	Sim	N.I.	Sim	N.I.	N.I.	ALUNORTE	N.I.
Célula 5 (expansão 5)	1999	Sim	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	ALUNORTE	N.I.
Célula 6 (expansão 6)	2001	Sim	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	ALUNORTE	JC - TOPOGRAFIA
Célula 7 (expansão 7)	2002	Sim	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	ALUNORTE	N.I.
Célula Sul	2007 a 2008	Sim	N.I.	Sim	N.I.	N.I.	Pimenta de Ávila Consultoria	RECORD ENGENHARIA
CL1	2009 a 2010	Sim	Sim	Sim	N.I.	Sim	Pimenta de Ávila Consultoria	MS TERRAPLANAGEM
CL2	2011 a 2012	Sim	N.I.	Sim ¹	N.I.	N.I.	Pimenta de Ávila Consultoria	N.I.
CL3	2013 a 2014	Sim	Sim	Sim	N.I.	Sim	Pimenta de Ávila Consultoria	MELO Equipamentos e Serviços de Construção

N.I. = Documento Não Identificado

¹Data referente a disponibilização do projeto "para compra"

² A especificação da geomembrana identificada dessas células diz respeito a espessura e o material utilizado.

A HYDRO disponibilizou os Relatórios de Serviços de Impermeabilização com Manta PEAD do Depósito DRS1, referente às estruturas Célula Leste CL3 (fundo do reservatório e taludes internos e externos), Bacias de Controle BC5 e BC7, Rápidos 5 e 11, junções e Canais de Contorno, elaborados pela empresa MELO Equipamentos e Serviços de Construção. Nestes relatórios são apresentados os registros de lançamento de geomembrana, solda de geomembrana, ensaios não destrutivos de pressurização e reparos referente aos meses de outubro, novembro e dezembro/2013 e janeiro, fevereiro, março, abril, agosto, setembro e novembro/2014.

7.3.2 Considerações sobre os ensaios para verificação da estanqueidade

Conforme indicado no documento FG-2201-NHB-A-BA-RT11-01, emitido pela FONNTES em março de 2023, em função da incipiência de regulamentação nacional à época da implantação das primeiras células do DRS1, a qualidade e quantidade dos registros da impermeabilização das células foi incrementada ao longo dos anos, tendo as células mais recentes um maior volume e qualidade dos dados.

De acordo com os documentos consultados, nas diferentes células do DRS1 foi aplicada geomembrana com espessura variável, de 0,75mm a 1,50mm. Sendo que nas células mais antigas, diante de uma regulamentação menos restritiva e as vezes até inexistente, foi aplicado geomembrana, entretanto, sem um registro de documentos de engenharia como nas células mais novas. Todavia, é destacada a preocupação em garantir a estanqueidade do DRS1, uma vez que já em 1984 foi prevista a análise da aplicação de camada impermeabilizante com geossintéticos sob o depósito.

Para tentar resgatar um pouco mais do histórico das células antigas, foi informado a FONNTES em reunião, que a equipe técnica da ALUNORTE entrou em contato com o projetista da Célula Inicial. Esse resgate de informações, apesar de ter sido apenas

AVALIAÇÃO DO PROJETO DE REVESTIMENTO E MONITORAMENTO DOS TALUDES

verbal, foi importante para um entendimento do contexto da época, quando a normatização brasileira era inexistente. De acordo com o relato do projetista original foi utilizado o que existia de normatização à época, que eram apenas algumas normas internacionais. Os fornecedores de geomembrana no Brasil também eram limitados em função de os produtos não serem produtos utilizados no Brasil, além de existir poucos tipos geomembrana disponíveis para aplicação. Segundo o projetista, os conceitos do projeto da Célula Inicial foram replicados nas outras células executadas posteriormente.

Com o passar dos anos e o aumento do arcabouço regulamentar acerca da aplicação e controle tecnológico de geomembranas para impermeabilização, foi também acrescido o controle e a qualidade do material aplicado sob as células do DRS1.

No que diz respeito a vida útil das geomembranas, a resistência química e durabilidade das geomembranas de modo geral são manifestados pela oxidação ou ação de raios ultravioleta, temperatura e agentes biológicos, para isso são empregados aditivos na composição da geomembrana como o negro de fumo, antioxidantes e estabilizadores.

Koerner (2011) apresenta um estudo de predição de vida útil das geomembranas PEAD para condições não expostas e diferentes temperaturas. Com base na temperatura de 30°C para geomembrana não exposta, a vida útil é de 166 anos e com base na temperatura de 35°C a vida útil é de 106 anos. A média das temperaturas máximas anuais na região do depósito é de 31,6°C, o que permite-nos estimar uma vida útil de aproximadamente 150 anos.

É possível afirmar que foram seguidos os padrões e regulamentações existentes à época da implantação da geomembrana impermeabilizante de cada célula do DRS1, tendo sido adotados critérios muitas vezes conservadores e mais restritivos que as normas vigentes.

AVALIAÇÃO DO PROJETO DE REVESTIMENTO E MONITORAMENTO DOS TALUDES

Entretanto, para investigar a estanqueidade da camada impermeabilizante, se fazem necessários outros instrumentos além dos registros históricos de aplicação da geomembrana. A eficiência da estanqueidade da geomembrana precisa ser sempre avaliada ao longo do tempo através da instrumentação de controle, em especial por meio dos piezômetros, INA's e poços ambientais.

Por fim, ainda que tenham sido adotadas premissas conforme a regulamentação internacional e nacional quando existentes, apenas com base nos registros documentais existentes não é possível comprovar a estanqueidade da geomembrana aplicada sob o DRS1, mas sim a instalação dentro de critérios e padrões que tem sua evolução técnica ocorrendo ao longo do tempo na engenharia brasileira.

A correta leitura e interpretação da instrumentação à luz do estudo de background ambiental, irá verificar se de fato a geomembrana está cumprindo o seu papel ao longo do tempo. Maiores detalhes sobre a instrumentação de monitoramento da qualidade das águas subterrâneas foram apresentados no relatório que responde à pergunta de letra D da TAC 3.1, FG-2201-NHB-A-BA-RT07.

8. CONCLUSÕES

Tendo em vista que a avaliação do projeto de revestimento e monitoramento dos taludes do DRS1 foi abordada nas letras "D", "N" e "O" da TAC 3.1. O presente documento apresentou, de forma sucinta, os estudos realizados nos demais relatórios, bem como as principais conclusões obtidas.

O monitoramento dos taludes foi abordado com maiores detalhes na letra "D" da TAC 3.1, doc. FG-2201-NHB-A-BA-RT07-01, que é exclusivo sobre instrumentação e monitoramento. Em relação aos instrumentos de monitoramento do nível freático /

AValiação DO PROJETO DE REVESTIMENTO E MONITORAMENTO DOS TALUDES

piezométrico dos diques de controle, observa-se que, de modo geral, os INA's e PZ's instalados acima da cota do terreno apresentam leituras secas, ou seja, o nível freático / piezométrico se encontra mais profundo do que a cota de fundo dos instrumentos. Além disso, observa-se que o nível d'água nos poços de monitoramento localizados a jusante do Dique de Contorno apresentam variações em suas leituras coerentes com as leituras dos piezômetros mais profundos, instalados na fundação do Dique de Contorno.

Ao comparar as seções do Dique de Contorno com as seções traçadas no interior do depósito DRS1 (LPS, 2022, doc. RT-8400-54-G-180), verifica-se o nível d'água se encontra consideravelmente mais elevado no interior do depósito e nas Bacias de Contorno do que no maciço do Dique de Contorno. Com isso, foi possível verificar que há estanqueidade da Geomembrana PEAD que impermeabiliza os diques, os canais e as bacias.

Em relação às bacias de controle, estas são lidas manualmente por réguas limnimétricas em cada turno, e seu bombeamento obedece a um procedimento operacional baseado em níveis de controle adotados em função da diferença percentual entre a crista dos reservatórios e o nível d'água atingido com cada evento de precipitação simulado. Durante a visita técnica também pôde ser visto que os canais de contorno e as bacias são monitoradas por câmeras. Foi possível concluir que o monitoramento do nível dessas bacias é adequado.

Em relação a densidade de instrumentos para monitoramento do nível freático / piezométrico, com base na quantidade de instrumentos, locação das seções e interpretação das leituras dos instrumentos, concluiu-se que a densidade de instrumentação no Depósito DRS1 é adequada. A exceção está na região sul do Dique de Contorno, onde o monitoramento é realizado exclusivamente por marcos superficiais. Não há nessa região um monitoramento do Dique de Contorno realizado por INA's e PZ's como em outras regiões da estrutura.

AVALIAÇÃO DO PROJETO DE REVESTIMENTO E MONITORAMENTO DOS TALUDES

Em relação ao monitoramento das águas subterrâneas, entendeu-se que a distribuição dos poços e frequência de medições está adequada para a finalidade de monitoramento da qualidade das águas subterrâneas. Entretanto, caso sejam identificados valores atípicos em alguns dos poços, a malha de monitoramento poderá ser complementada. Destaca-se que os parâmetros analisados e o número de poços são aqueles estabelecidos na condicionante da Licença de Operação da ALUNORTE, analisados por especialista da área ambiental e reportados ao órgão fiscalizador.

A interpretação dos resultados dos testes relativos à aplicação do material sobre as geomembranas foi verificada na letra “N”, doc. FG-2201-NHB-A-BA-RT21. Após a análise, concluiu-se que foi adotado valor de espessura da geomembrana adequado sob os resíduos para atender aos esforços que o DRS1 irá exercer ao final de sua implantação para as células CL 1, 2 e 3, lembrando que sob os resíduos é utilizada geomembrana de 1,5mm de espessura. Além disso, também foi identificado que a gramatura do geotêxtil de proteção ao puncionamento foi dimensionada de forma conservadora e a vala de ancoragem da geomembrana está adequada. Para as células cujos cálculos foram verificados, foi possível concluir que o dimensionamento proposto em projeto está adequado.

Por fim, o controle tecnológico da execução das geomembranas de PEAD com ensaios destrutivos e não destrutivos para verificação da estanqueidade da Geomembrana foi apresentada na letra “O”, doc. FG-2201-NHB-A-BA-RT11. Os registros dos Relatórios de Serviços de Impermeabilização com Manta PEAD do Depósito DRS1 indicam o lançamento de Geomembrana PEAD com espessura de 1,50 mm na Célula Leste CL3, nas Bacias de Controle BC5 e BC7, nos canais de contorno e nos Rápidos 5 e 11 e indicam a execução das soldagens dos painéis com o equipamento COMET.

AVALIAÇÃO DO PROJETO DE REVESTIMENTO E MONITORAMENTO DOS TALUDES

Os relatórios indicam a execução de ensaios não destrutivo de pressurização, utilizando-se o equipamento Agulha de Teste e aplicando uma pressão de 2 Bar, sendo possível verificar que não houve perda de pressão em nenhum dos ensaios realizados, indicando resultados adequados. Por fim, os relatórios apresentam a execução de reparos na geomembrana PEAD devido a danos mecânicos, através da execução de “manchão” e, na sequência, executando ensaio de vácuo, obtendo-se resultados adequados. O relato histórico de danos mecânicos, com o registro de que foram reparados e testados quanto a qualidade do reparo é um fato importante, indica que ocorreu uma avaliação de fato quanto à qualidade de instalação.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- i. ALMARAZ, U. J. S. (1977). Aspectos Geoquímicos e Ambientais dos Calcários do Formação Pirabas, Pará. Tese de Doutorado, UFRS, 272 p.
- ii. ASTM D 4545 (1986) “Standard Practice for Determining the Integrity of Factory Seams Used in Joining Manufactured Flexible Sheet Geomembranes” – American Society of Testing and Materials.
- iii. ASTM D 4437 (1999) “Standard Practice for Determining the Integrity of Field Seams Used in Joining Flexible Polymeric Sheet Geomembranes” – American Society of Testing and Materials.
- iv. ASTM D 6392 (1999): “Standard Test Method for Determining the Integrity of Nonreinforced Geomembrane Seams produced using Thermo-Fusion Methods” – American Society of Testing and Materials.
- v. ASTM D 6693 (2001): “Standard Test Method for Determining Tensile Properties of Nonreinforced Polyethylene and Nonreinforced Flexible Polypropylene Geomembranes” - American Society of Testing and Materials.

AVALIAÇÃO DO PROJETO DE REVESTIMENTO E MONITORAMENTO DOS TALUDES

- vi. 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.
- vii. 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.
- viii. IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Barcarena/PA. População. 2010. Disponível em <[IBGE | Cidades@ | Pará | Barcarena | Panorama](#)>
- 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, R.M.; HSUAN, Y.G.; KOERNER, G. R. (2011). Geomembrane lifetime prediction: unexposed and exposed conditions. GRW White Paper No.6. Original: 7 June 2005; updated: 8 February 2011.
- 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. 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.
- xvi. 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