

FG-2201-NHB-A-BA-RT21-02

À

**NORSK HYDRO BRASIL**

Av. Gentil Bittencourt, 549

Belém – PA

A/C

CAROLINA VARKALA

Departamento de Suprimentos de Bauxita &amp; Alumina

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

Prezada,

Apresentamos o relatório técnico de Interpretação dos resultados dos testes relativos à aplicação do material sobre as geomembranas, em atendimento à letra “N” 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



**FONNTES**  
G E O T É C N I C A

FG-2201-NHB-A-BA-RT21-02

# RELATÓRIO TÉCNICO DE INTERPRETAÇÃO DE TESTES RELATIVOS À APLICAÇÃO DO MATERIAL SOBRE A GEOMEMBRANA DO DRS1

CLIENTE:



PROJETO:

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

**BARCARENA - PA**



agosto/2023



**INTERPRETAÇÃO DOS TESTES RELATIVOS À APLICAÇÃO DOS MATERIAIS SOBRE A  
GEOMEMBRANA DO DRS1****SUMÁRIO**

<b>GLOSSÁRIO .....</b>	<b>1</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>3</b>
<b>2. OBJETIVO .....</b>	<b>6</b>
<b>3. DADOS UTILIZADOS .....</b>	<b>7</b>
<b>4. ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO .....</b>	<b>8</b>
<b>5. APRESENTAÇÃO DA ESTRUTURA.....</b>	<b>9</b>
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> .....	21
5.3 DRENAGEM INTERNA .....	22
5.4 SISTEMA EXTRAVASOR E DRENAGEM SUPERFICIAL .....	23
5.5 INSTRUMENTAÇÃO .....	23
5.6 FECHAMENTO DO DEPÓSITO DRS1 .....	24
<b>6. METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO .....</b>	<b>28</b>
<b>7. DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO.....</b>	<b>29</b>
7.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	29
7.2 CÉLULA LESTE 3 (CL3).....	32
7.2.1 <i>Propriedade dos materiais geossintéticos implantados no DRS1</i> .....	35
7.2.2 <i>Avaliação da FONNTES</i> .....	38
<b>8. CONCLUSÕES .....</b>	<b>51</b>
<b>9. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>52</b>

**INTERPRETAÇÃO DOS TESTES RELATIVOS À APLICAÇÃO DOS MATERIAIS SOBRE A  
GEOMEMBRANA DO DRS1****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

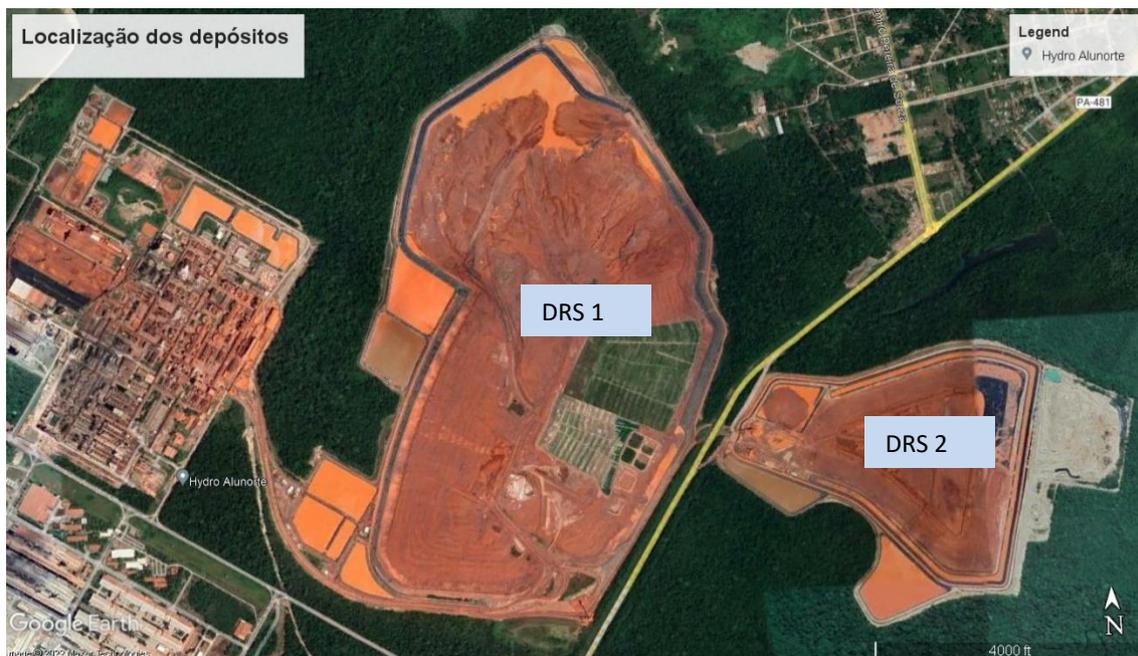
		<b>AUDITORIA DE SEGURANÇA</b>
<b>INTERPRETAÇÃO DOS TESTES RELATIVOS À APLICAÇÃO DOS MATERIAIS SOBRE A GEOMEMBRANA DO DRS1</b>		

- 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
- Ru – Coeficiente de geração de poropressão
- 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)

		<b>AUDITORIA DE SEGURANÇA</b>
<b>INTERPRETAÇÃO DOS TESTES RELATIVOS À APLICAÇÃO DOS MATERIAIS SOBRE A GEOMEMBRANA DO DRS1</b>		

## 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

		<b>AUDITORIA DE SEGURANÇA</b>
<p style="text-align: center;">INTERPRETAÇÃO DOS TESTES RELATIVOS À APLICAÇÃO DOS MATERIAIS SOBRE A GEOMEMBRANA DO DRS1</p>		

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 - 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

INTERPRETAÇÃO DOS TESTES RELATIVOS À APLICAÇÃO DOS MATERIAIS SOBRE A  
GEOMEMBRANA DO DRS1

- 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 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;**

		<b>AUDITORIA DE SEGURANÇA</b>
<b>INTERPRETAÇÃO DOS TESTES RELATIVOS À APLICAÇÃO DOS MATERIAIS SOBRE A GEOMEMBRANA DO DRS1</b>		

- 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 **n)**, referido à interpretação dos resultados dos testes relativos à aplicação do material sobre as geomembranas.

## 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 **“n) Interpretação dos resultados dos testes relativos à aplicação do material sobre as geomembranas;”** para o depósito de resíduos DRS1.

		<b>AUDITORIA DE SEGURANÇA</b>
<p style="text-align: center;">INTERPRETAÇÃO DOS TESTES RELATIVOS À APLICAÇÃO DOS MATERIAIS SOBRE A GEOMEMBRANA DO DRS1</p>		

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 escopo do presente trabalho. Abaixo é reproduzido o extrato do ofício com a explicação do entendimento para resposta da pergunta **letra N)**, objeto desse relatório.

*A pergunta se refere a ensaios de interação da geomembrana com o solo de cobertura, ou seja, a determinação do ângulo de atrito entre o solo e a geomembrana. Iremos avaliar esses ensaios, caso existam, e verificar se foram considerados de forma adequada para escolha do modelo e espessura das geomembranas, assim como na determinação dos seus critérios de instalação, como comprimento de soldas e valas de ancoragem, por exemplo.*

### **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.

		<b>AUDITORIA DE SEGURANÇA</b>
<b>INTERPRETAÇÃO DOS TESTES RELATIVOS À APLICAÇÃO DOS MATERIAIS SOBRE A GEOMEMBRANA DO DRS1</b>		

**Tabela 3.1 – Documentos recebidos e utilizados na elaboração deste estudo**

<b>CÓDIGO</b>	<b>TÍTULO DO DOCUMENTO</b>	<b>ELABORADO POR</b>	<b>DATA</b>
RT-3540-54-G-1014 R02	Relatório Técnico do Projeto “As Is”	PIMENTA DE AVILA	29/07/21
D1-3540-54-G-1103 R01	ÁREA 54A-DEPÓSITO DE RESÍDUOS SÓLIDOS - DRS1 – PROJETO AS IS – EXPANSÕES DO DEPÓSITO - PLANTA	PIMENTA DE AVILA	02/06/21
D1-3540-54-G-022 R09	DEPÓSITO DE RESÍDUOS SÓLIDOS - ÁREA 54A - PROJETO EXECUTIVO - CÉLULA LESTE CL3 - PLANTA DE LOCAÇÃO DOS EIXOS	PIMENTA DE AVILA	01/07/12
MD-3540-54-G-091 R04	Memorial Descritivo do Projeto de Expansão do DRS Célula Leste	PIMENTA DE AVILA	01/07/10
D1-3540-54-G-096 R01	DEPÓSITO DE REJEITOS SÓLIDOS - ÁREA 54A - EXPANSÃO DO DRS PARA LESTE - CÉLULA LESTE - CL1/CL2/CL3 - PLANTA GERAL	PIMENTA DE AVILA	01/02/10
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
DB-3541-54-G-319	Memória de cálculo das análises geotécnicas do projeto detalhado do DRS2	PIMENTA DE ÁVILA CONSULTORIA LTDA	2016

#### **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

		<b>AUDITORIA DE SEGURANÇA</b>
<b>INTERPRETAÇÃO DOS TESTES RELATIVOS À APLICAÇÃO DOS MATERIAIS SOBRE A GEOMEMBRANA DO DRS1</b>		

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

		<b>AUDITORIA DE SEGURANÇA</b>
<b>INTERPRETAÇÃO DOS TESTES RELATIVOS À APLICAÇÃO DOS MATERIAIS SOBRE A GEOMEMBRANA DO DRS1</b>		

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 desaguamento 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).

INTERPRETAÇÃO DOS TESTES RELATIVOS À APLICAÇÃO DOS MATERIAIS SOBRE A  
GEOMEMBRANA DO DRS1

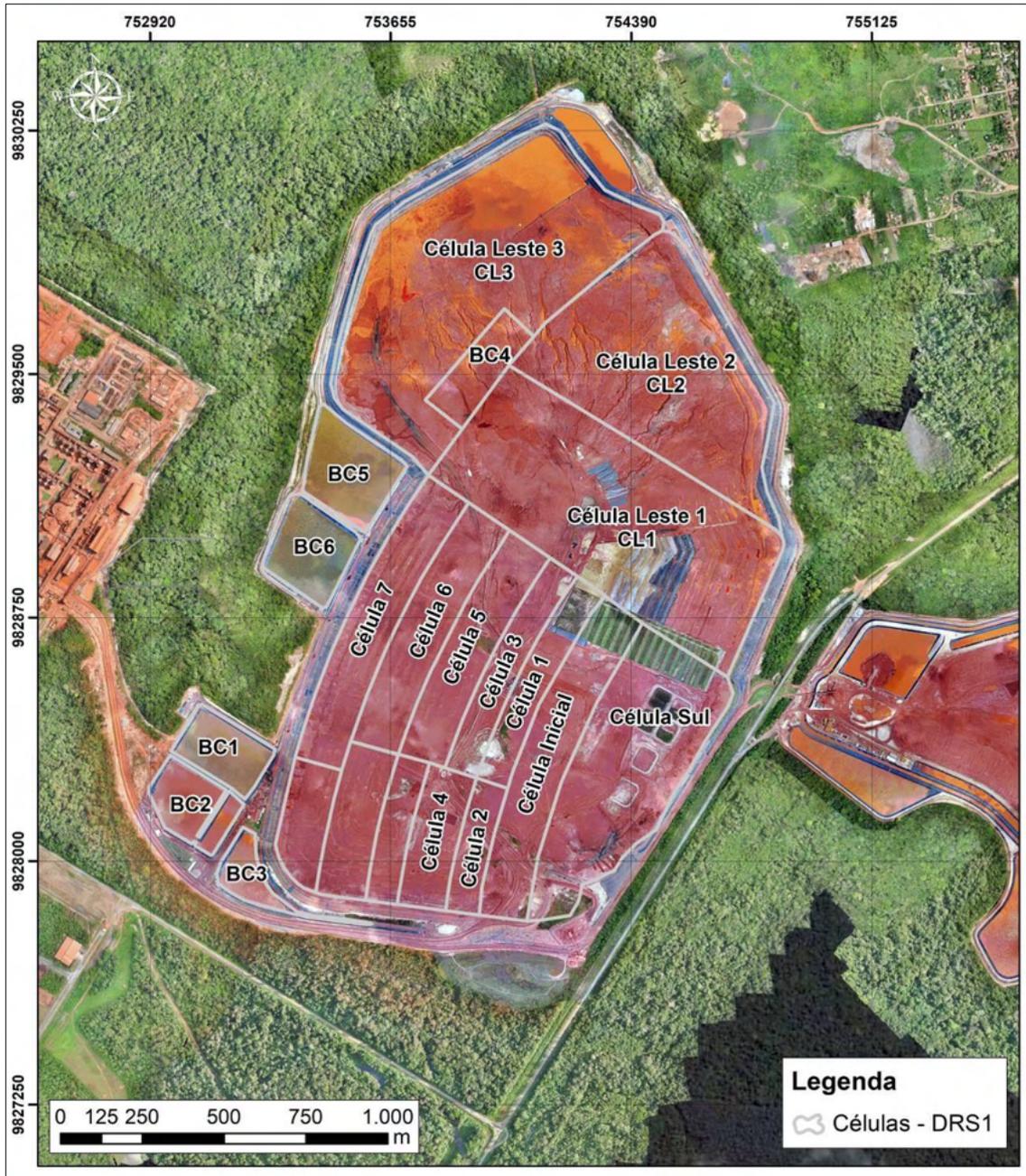


Figura 5.1 – Identificação das células e bacias de contribuição do DRS1 (Pimenta de Avila, 2021).

		<b>AUDITORIA DE SEGURANÇA</b>
<b>INTERPRETAÇÃO DOS TESTES RELATIVOS À APLICAÇÃO DOS MATERIAIS SOBRE A GEOMEMBRANA DO DRS1</b>		

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”.

### **5.1 LOCALIZAÇÃO**

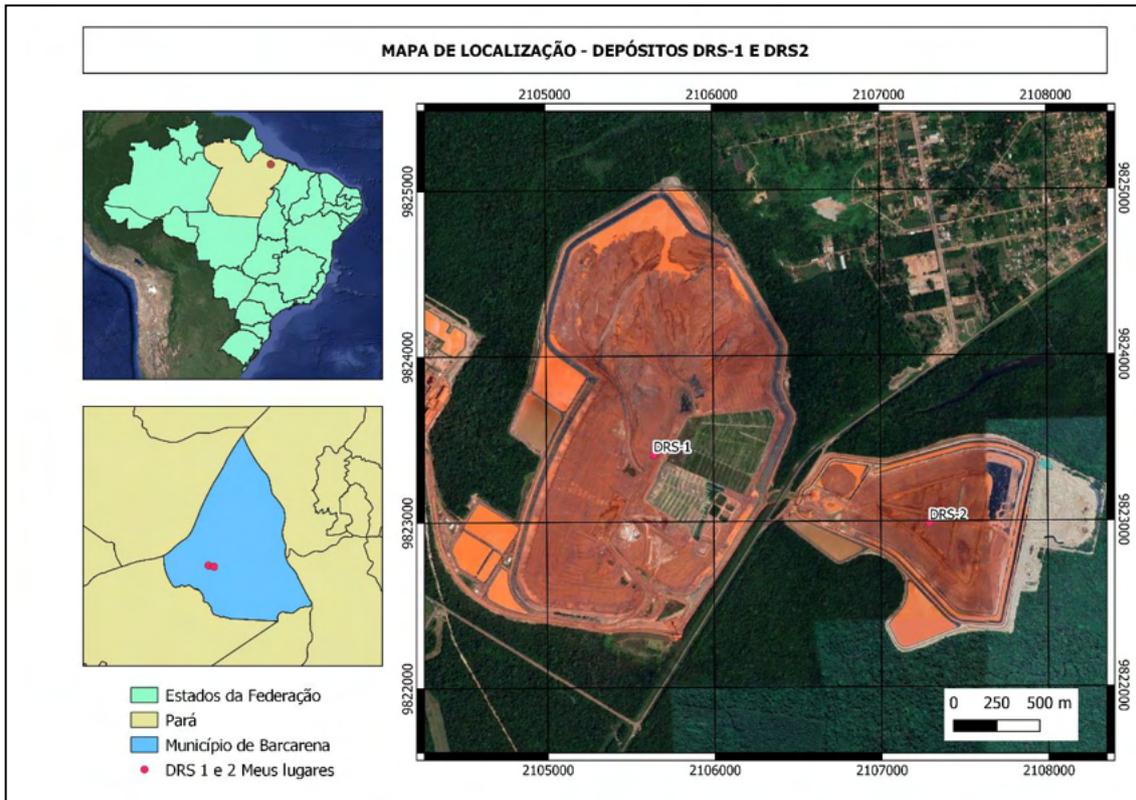
Localizados no município de Barcarena, no estado do Pará, o sistema de disposição de resíduos pertencente à ALUNORTE é composto pelos Depósitos de Resíduos Sólidos DSR1 e DSR2 e situa-se em torno das coordenadas UTM/DATUM SIRGAS 2000 754.812 E 9.828.482 S.

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.

**INTERPRETAÇÃO DOS TESTES RELATIVOS À APLICAÇÃO DOS MATERIAIS SOBRE A  
GEOMEMBRANA DO DRS1**



**Figura 5.2 – Localização da Estrutura – DRS1 e DRS2**

O município de Barcarena está localizado no bioma Amazônia, apresentando 1.310,34 km<sup>2</sup> 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

		<b>AUDITORIA DE SEGURANÇA</b>
<b>INTERPRETAÇÃO DOS TESTES RELATIVOS À APLICAÇÃO DOS MATERIAIS SOBRE A GEOMEMBRANA DO DRS1</b>		

habitantes por quilômetro quadrado. Conforme **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, 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 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)

		<b>AUDITORIA DE SEGURANÇA</b>
INTERPRETAÇÃO DOS TESTES RELATIVOS À APLICAÇÃO DOS MATERIAIS SOBRE A GEOMEMBRANA DO DRS1		

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).

INTERPRETAÇÃO DOS TESTES RELATIVOS À APLICAÇÃO DOS MATERIAIS SOBRE A GEOMEMBRANA DO DRS1



Figura 5.4 – Histórico de expansão do DRS1 e DRS2

		<b>AUDITORIA DE SEGURANÇA</b>
<b>INTERPRETAÇÃO DOS TESTES RELATIVOS À APLICAÇÃO DOS MATERIAIS SOBRE A GEOMEMBRANA DO DRS1</b>		

## 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).

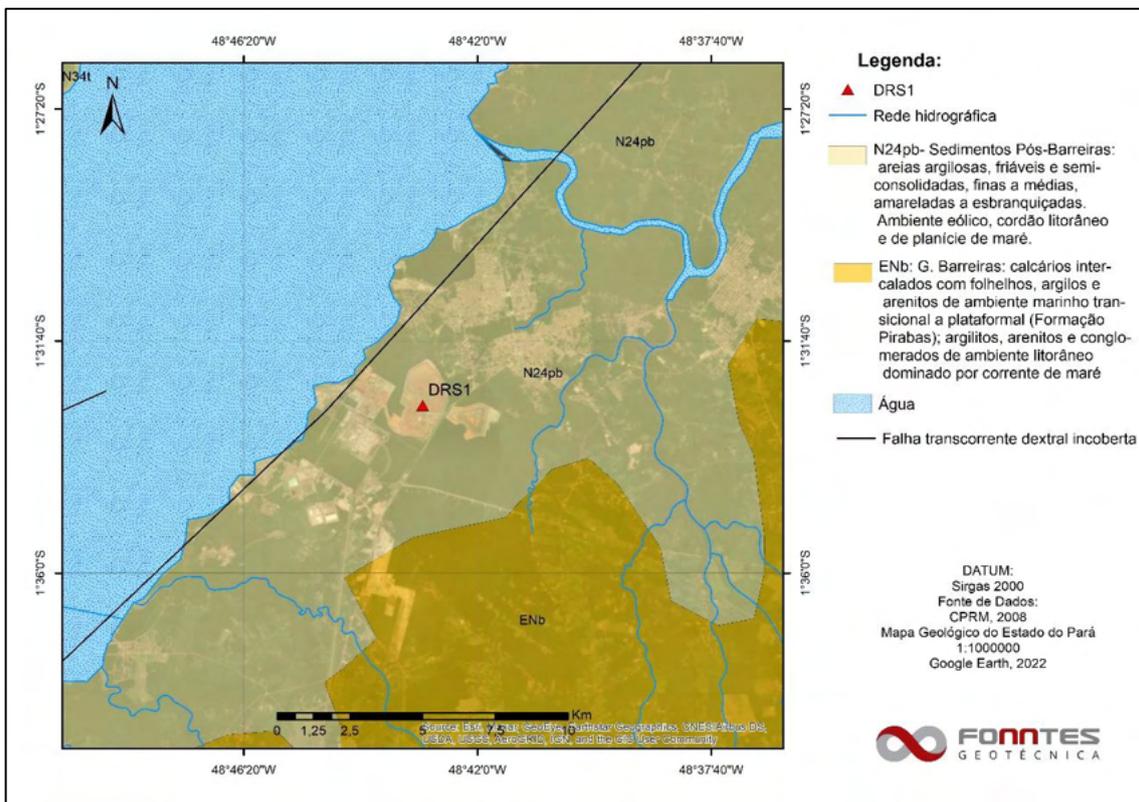
Conforme apresentado no Mapa Geológico do Estado do Pará, desenvolvido pela CPRM em 2008 (Figura 5.5), a estrutura DRS1 encontra-se sobre Sedimentos Pós-Barreiras.

Ocupando uma área de aproximadamente 12000 m<sup>2</sup>, 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 seqüências.

**INTERPRETAÇÃO DOS TESTES RELATIVOS À APLICAÇÃO DOS MATERIAIS SOBRE A  
GEOMEMBRANA DO DRS1**

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

**INTERPRETAÇÃO DOS TESTES RELATIVOS À APLICAÇÃO DOS MATERIAIS SOBRE A  
GEOMEMBRANA DO DRS1**

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.

### 5.2.1 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**

<b>CAMPANHA</b>	<b>EMPRESA</b>	<b>ANO</b>	<b>DOCUMENTO</b>
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)

		<b>AUDITORIA DE SEGURANÇA</b>
<b>INTERPRETAÇÃO DOS TESTES RELATIVOS À APLICAÇÃO DOS MATERIAIS SOBRE A GEOMEMBRANA DO DRS1</b>		

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.

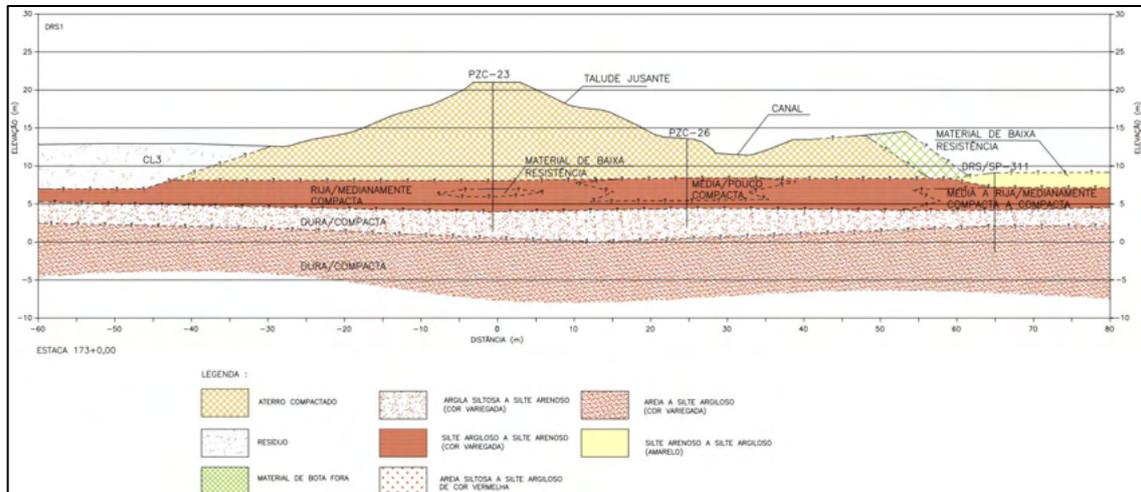
A estrutura DRS1 encontra-se sobre fundação que varia entre materiais predominantemente argilosos a arenosos, com coloração variegada e pontualmente é possível observar a presença de pedregulhos. A camada inferior é caracterizada por apresentar composição silto arenosa a silto argilosa e NSPT variando 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.

**INTERPRETAÇÃO DOS TESTES RELATIVOS À APLICAÇÃO DOS MATERIAIS SOBRE A  
GEOMEMBRANA DO DRS1**

Na região de jusante do canal de contorno da estrutura, é possível observar a ocorrência de materiais de botáfora, 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,

		<b>AUDITORIA DE SEGURANÇA</b>
<b>INTERPRETAÇÃO DOS TESTES RELATIVOS À APLICAÇÃO DOS MATERIAIS SOBRE A GEOMEMBRANA DO DRS1</b>		

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-RT11-00, FG-2201-NHB-A-BA-RT12-00, FG-2201-NHB-A-BA-RT21-00 e FG-2201-NHB-A-BA-RT22-00, 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 Célula 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 régua limnimétricas.

**INTERPRETAÇÃO DOS TESTES RELATIVOS À APLICAÇÃO DOS MATERIAIS SOBRE A  
GEOMEMBRANA DO DRS1**

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 do 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.

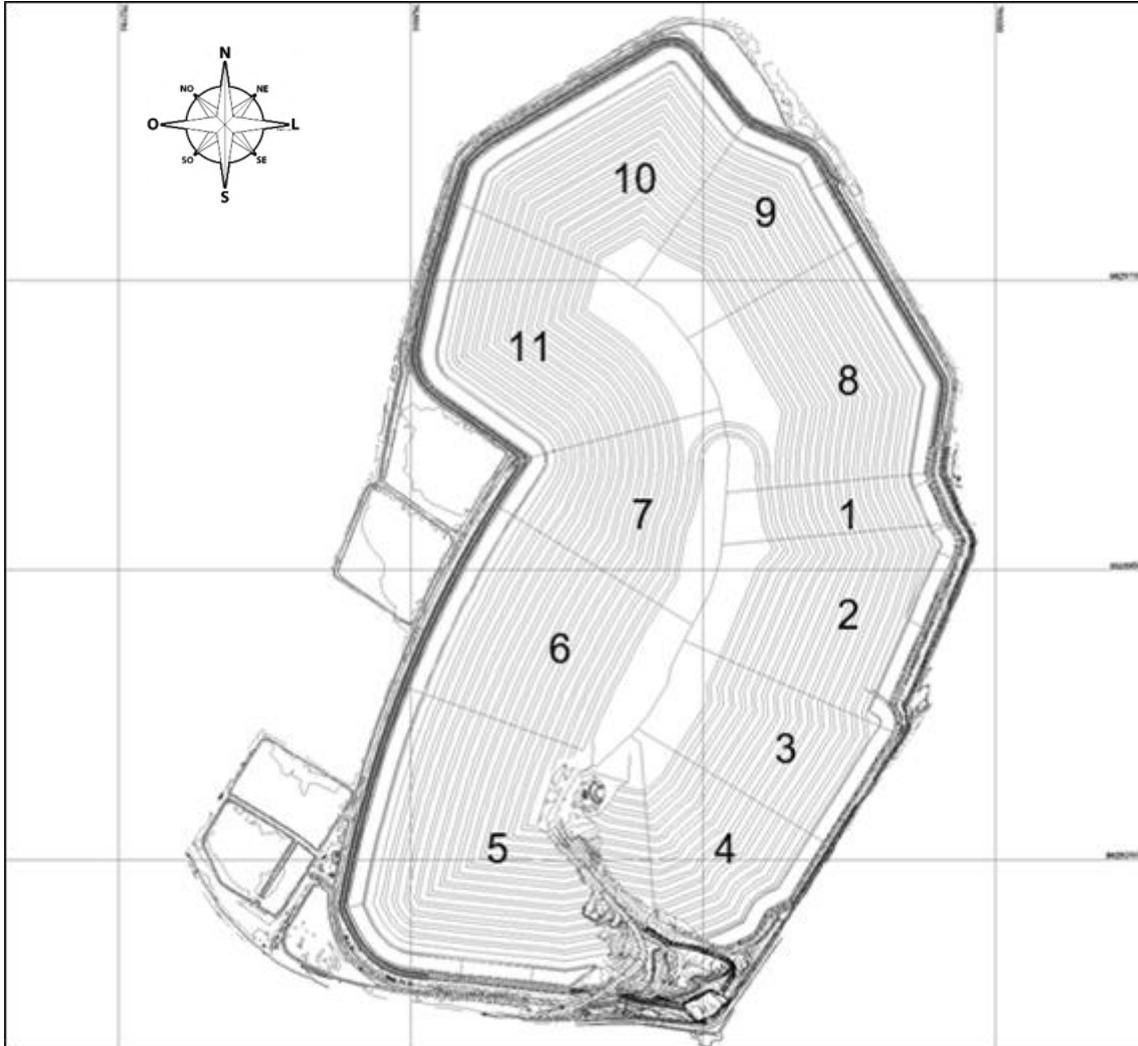
		<b>AUDITORIA DE SEGURANÇA</b>
<b>INTERPRETAÇÃO DOS TESTES RELATIVOS À APLICAÇÃO DOS MATERIAIS SOBRE A GEOMEMBRANA DO DRS1</b>		

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.

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.

**INTERPRETAÇÃO DOS TESTES RELATIVOS À APLICAÇÃO DOS MATERIAIS SOBRE A  
GEOMEMBRANA DO DRS1**



**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.

**INTERPRETAÇÃO DOS TESTES RELATIVOS À APLICAÇÃO DOS MATERIAIS SOBRE A  
GEOMEMBRANA DO DRS1**

**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 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.

*A pergunta se refere a ensaios de interação da geomembrana com o solo de cobertura, ou seja, a determinação do ângulo de atrito entre o solo e a geomembrana. Iremos avaliar esses ensaios, caso existam, e verificar se foram considerados de forma adequada para escolha do modelo e espessura das geomembranas, assim como na determinação dos seus critérios de instalação, como comprimento de soldas e valas de ancoragem, por exemplo.*

Será avaliado se a escolha da geomembrana para o DRS1 levou em consideração a interação da mesma com os materiais de fundação e cobertura, ou seja, como foram realizados os cálculos e se foram realizados ensaios complementares. Caso existam, os mesmos serão avaliados e será verificado se foram considerados de forma adequada para escolha do modelo e espessura das geomembranas, assim como na determinação dos seus critérios de instalação, como comprimento de soldas e valas de ancoragem.

É apresentado 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

**INTERPRETAÇÃO DOS TESTES RELATIVOS À APLICAÇÃO DOS MATERIAIS SOBRE A  
GEOMEMBRANA DO DRS1**

“Manual Brasileiro de Geossintéticos” para avaliação dos materiais projetados para impermeabilização.

## **7. DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO**

### **7.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

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, bem como dos testes relativos à aplicação dos resíduos sobre a geomembrana apresenta diferentes níveis de detalhe e profundidade de acordo com a época de aplicação. 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, reparos realizados durante a instalação e parâmetros geotécnicos para aplicação dos resíduos sobre a geomembrana.

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.

		<b>AUDITORIA DE SEGURANÇA</b>
<b>INTERPRETAÇÃO DOS TESTES RELATIVOS À APLICAÇÃO DOS MATERIAIS SOBRE A GEOMEMBRANA DO DRS1</b>		

Visando consolidar os registros históricos de aplicação de geomembrana sobre cada célula do DRS1, apresenta-se a Tabela 7.1, onde pode ser vista a existência dos documentos, data de instalação da geomembrana em cada célula, empresa projetista e empresa executora. Não foram identificados documentos que indiquem as especificações técnicas e construtivas das células mais antigas, documentos estes fundamentais para aferição dos testes relativos à aplicação dos resíduos sobre a geomembrana. Por esse motivo, foi feita análise dos materiais aplicados nas células mais recentes do DRS1. Essa análise será apresentada nos itens que se seguem.

Mais informações sobre a geomembrana aplicada nas células iniciais do DRS1 são apresentadas no relatório FG-2201-NHB-RT11.

**INTERPRETAÇÃO DOS TESTES RELATIVOS À APLICAÇÃO DOS MATERIAIS SOBRE A GEOMEMBRANA DO DRS1**
**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 <sup>1</sup>	Sim	N.I.	Sim <sup>2</sup>	N.I.	N.I.	LPS Consultoria e Engenharia	NORSAN Impermeabilização e comércio LTDA
Célula 1 (expansão 1)	1996	Sim	N.I.	Sim <sup>2</sup>	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 <sup>2</sup>	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 <sup>1</sup>	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

<sup>1</sup>Data referente a disponibilização do projeto "para compra"

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

		<b>AUDITORIA DE SEGURANÇA</b>
INTERPRETAÇÃO DOS TESTES RELATIVOS À APLICAÇÃO DOS MATERIAIS SOBRE A GEOMEMBRANA DO DRS1		

## 7.2 CÉLULA LESTE 3 (CL3)

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/m<sup>2</sup>. Nos taludes de jusante, que não há contato com os resíduos, foi implantado geomembrana PEAD 1,0mm visando prevenir processos erosivos sobre o talude. A Figura 7.1 e Figura 7.2 exemplifica o sistema de impermeabilização acima descrito.

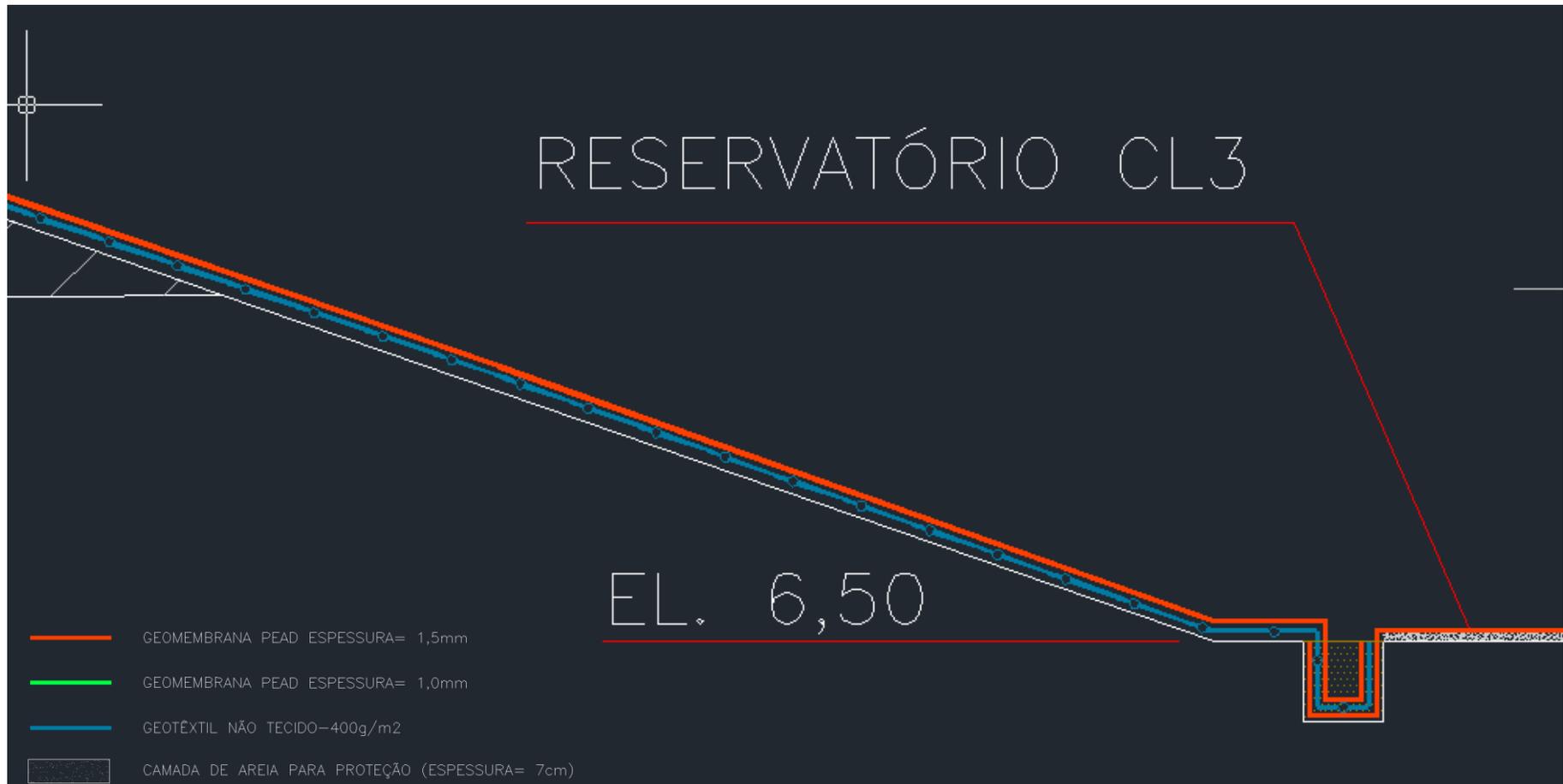


Figura 7.1 – Exemplo do sistema de impermeabilização (AN-430-DS-23288-02)

INTERPRETAÇÃO DOS TESTES RELATIVOS À APLICAÇÃO DOS MATERIAIS SOBRE A GEOMEMBRANA DO DRS1

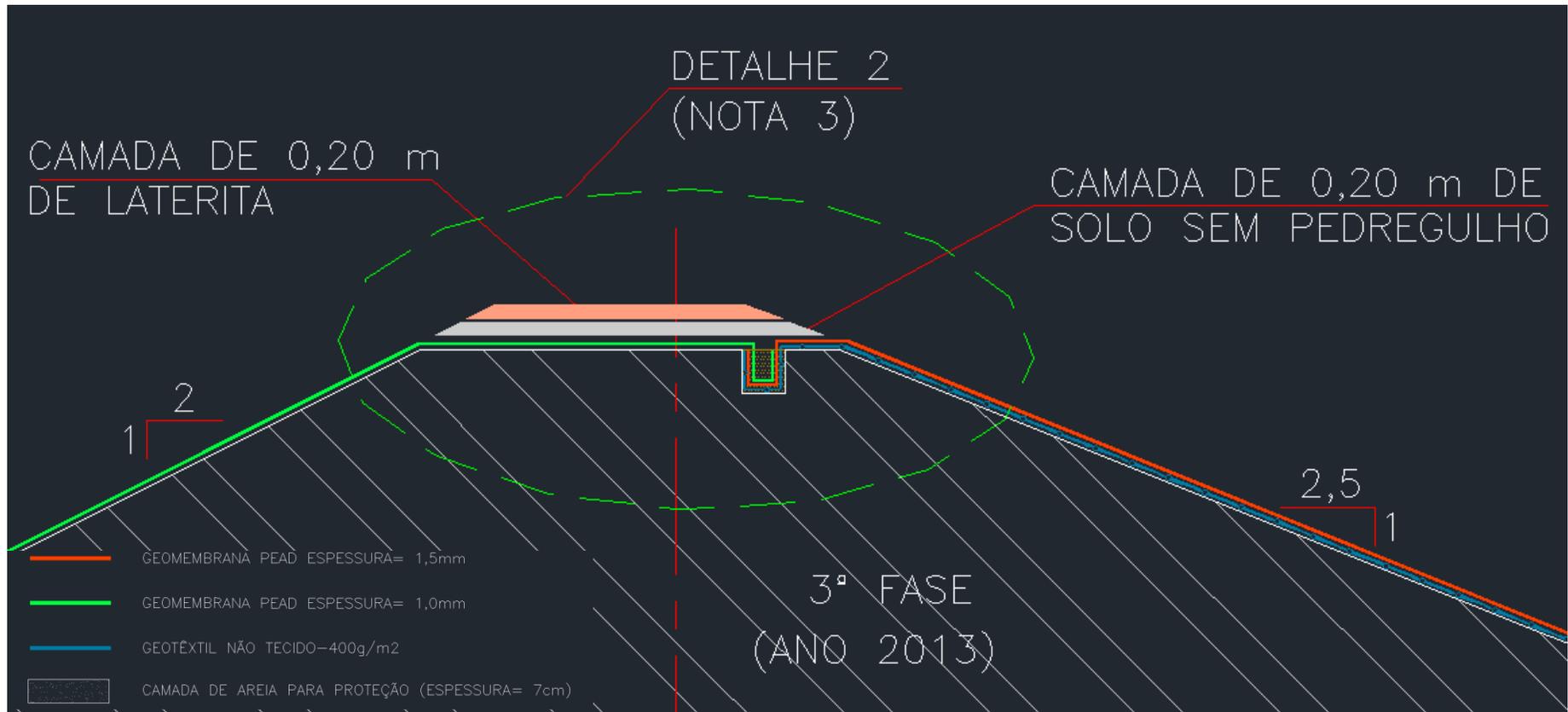


Figura 7.2 – Segundo exemplo do sistema de impermeabilização (AN-430-DS-23288-02)

**INTERPRETAÇÃO DOS TESTES RELATIVOS À APLICAÇÃO DOS MATERIAIS SOBRE A  
GEOMEMBRANA DO DRS1**

Desde modo, será verificado se a espessura da geomembrana sob os resíduos está adequada nos taludes em contato com o resíduo e no fundo do reservatório, dado que são revestimentos diferentes, um com areia e um com geotêxtil.

**7.2.1 Propriedade dos materiais geossintéticos implantados no DRS1**
**7.2.1.1 Geomembrana de PEAD de Face Lisa**

A Especificação Técnica de recebimento, aceitação e instalação do sistema de impermeabilização da CL3 (documento ES-3540-54-G-222) apresenta as propriedades da geomembrana PEAD utilizadas na célula 3 (CL3) do DRS1. A Tabela 7.2 apresenta as propriedades da geomembrana de face lisa com espessura de 1,5mm e 1,0mm recomendadas no projeto da CL3 do DRS1.

**Tabela 7.2 – Propriedades das geomembranas PEAD lisas**

Propriedade	Valores		Método de Ensaio
	1,0 mm	1,5 mm	
<b>1.Espessura mínima</b>	1,0 mm	1,5 mm	ASTM D 5199
<b>2.Densidade Mínima</b>	0,940 g/cm <sup>3</sup>	0,940 g/cm <sup>3</sup>	ASTM D 792 – Método B ou ASTM D1505
<b>3.Propriedades Mínimas de Resistência à Tração – Ensaio Índice:</b>			ASTM F 6693 Tipo IV
<b>3.1. Tensão de Escoamento</b>	15 kN/m	22 kN/m	
<b>3.2. Alongamento no Escoamento</b>	13%	13%	
<b>3.3. Tensão na Ruptura</b>	27 kN/m	40 kN/m	
<b>3.4. Alongamento na Ruptura</b>	700%	700%	
<b>4. Propriedades Mínimas de Resistência à Tração – Ensaio de Desempenho:</b>			ASTM D 4885
<b>4.1. Tensão de Escoamento</b>	16 kN/m	24 kN/m	
<b>4.2. Alongamento no Escoamento</b>	15%	15%	
<b>4.3. Tensão na Ruptura</b>	11 kN/m	16 kN/m	
	500%	500%	

**INTERPRETAÇÃO DOS TESTES RELATIVOS À APLICAÇÃO DOS MATERIAIS SOBRE A  
GEOMEMBRANA DO DRS1**

Propriedade	Valores		Método de Ensaio
<b>4.4. Alongamento Máximo [1]</b>			
<b>5. Resistência ao Rasgo Mínima</b>	125 N	187 N	ASTM D 1004
<b>6. Resistência ao Puncionamento Mínima</b>	320 N	480 N	ASTM D 4833
<b>7. Teor Negro de Fumo</b>	> 2% e < 3%	> 2% e < 3%	ASTM D 1603 ou ASTM D 4218
<b>8. Dispersão de Negro de Fumo</b>	[nota 2]	[nota 2]	ASTM D 5596
<b>9. Fissuramento sob Tensão</b>	≥ 400 horas	≥ 400 horas	ASTM D 5397 Appendix
<b>10. Tempo de Oxidação Indutiva Standard (200°C, 1 atm O<sub>2</sub>)</b>	≥ 100 min.	≥ 100 min.	ASTM D 3895
<b>11. Tempo de Oxidação Indutiva Alta Pressão</b>	≥ 400 min.	≥ 400 min.	ASTM D 5885
<b>12. Índice de Fluidez [nota 3]</b>	< 1,0 g/10 min.	< 1,0 g/10 min.	ASTM D 1238 190° C, 2,16 kg
<b>13. Envelhecimento no Forno a 85° C [nota 4] com OIT Alta Pressão: % retida a 90 dias</b>	≥ 80%	≥ 80%	ASTM D 5721 ASTM D 5885
<b>14. Resistência UV [nota 5] com OIT Alta Pressão: % retida após 1600 horas [nota 6]</b>	≥ 50%	≥ 50%	GRI GM11 ASTM D 5885

**Notas:**

- [Nota 1]: A ruptura não é atingida para este alongamento.
- [Nota 2]: A Dispersão de Negro de Fumo para 10 amostras deverá apresentar: 9 amostras na categoria 1 ou na 2 e uma amostra na categoria 3.
  - [Nota 3]: Propriedade da resina de PEAD usada na fabricação da geomembrana.
- [Nota 4]: Deverá ser avaliada a porcentagem retida a 30 e a 60 dias, para comparação com a resposta da amostra a 90 dias.
- [Nota 5]: A condição de ensaio deverá ser ciclos alternados de 20 horas de exposição aos raios UV à 75º C, seguidas de 4 horas de condensação à 60º C.
- [Nota 6]: A resistência a UV é baseada no valor da porcentagem retida, não considerando o valor original do OIT alta pressão.

**INTERPRETAÇÃO DOS TESTES RELATIVOS À APLICAÇÃO DOS MATERIAIS SOBRE A  
GEOMEMBRANA DO DRS1**
**7.2.1.2 Geotêxtil não tecido**

As propriedades do geotêxtil não tecido recomendados no projeto do DRS1 são apresentadas na Tabela 7.3.

**Tabela 7.3 – Propriedades do geotêxtil não tecido utilizado no DRS1**

	Propriedades	Normas	Unidade	Valores Mínimos
<b>PROPRIEDADES MECÂNICAS</b>	Resistência à tração faixa larga			
	Valor na ruptura – L		kN/m	21
	Alongamento – L	NBR	%	>70
	Valor na ruptura – T	12824	kN/m	19
	Alongamento - T		%	>70
	Resistência ao Rasgo Trapezoidal			
	Transversal – T	ASTM D	N	540
	Longitudinal - L	4533	N	620
<b>PROPRIEDADES HIDRÁULICAS</b>	Resistência ao Puncionamento	ASTM D 13359	kN	3,60
	Permissividade	ASTM D 4491	s <sup>-1</sup>	25/25
	Permeabilidade Normal	ASTM D 4491	cm/s	668,0
	Transmissividade	ASTM D 4716	m <sup>2</sup> /s	1,5 x 10 <sup>-6</sup>
	Abertura de filtração (O95)	AFNOR G 38017	µm	80
<b>PROP. FÍSICAS</b>	Materia Prima			100% Polipropileno
	Ponto de fusão			165º C
	Gramatura	NBR 12568	g/m <sup>2</sup>	400

		<b>AUDITORIA DE SEGURANÇA</b>
<b>INTERPRETAÇÃO DOS TESTES RELATIVOS À APLICAÇÃO DOS MATERIAIS SOBRE A GEOMEMBRANA DO DRS1</b>		

### 7.2.1.3 Propriedades dos Acessórios

O fio de solda e o perfil de PEAD (inserto), acessórios utilizados na instalação da geomembrana PEAD, devem atender as propriedades relacionadas na Tabela 7.4. O inserto deverá apresentar ancoragem em três pontos, para garantir uma melhor fixação na estrutura de concreto.

**Tabela 7.4– Propriedades dos Acessórios: Fio de solda e Perfil de PEAD (inserto)**

Propriedade	Valor	Método Ensaio
Densidade Mínima	$\geq 0,940 \text{ g/cm}^3$	ASTM D 792 – Método B ou ASTM D 1505
Teor de Negro de Fumo	2% - 3%	ASTM D 1603 ou ASTM D 4218
Índice de Fluidez [nota]	< 1,0 g/10 min.	ASTM D 1238 190° C, 2,16 kg

- **Nota: Propriedade da resina de PEAD, usada na fabricação da geomembrana e dos acessórios.**

## 7.2.2 Avaliação da FONNTES

### 7.2.2.1 Verificação da espessura da geomembrana

Visando verificar se a adoção da geomembrana utilizada sob os resíduos dispostos foi feita de maneira adequada, a FONNTES realizou verificação com base nos parâmetros do solo e do resíduo disposto. Neste item será avaliada apenas a geomembrana de 1,5mm de espessura, que se encontra sob os rejeitos. Isto se justifica pois as geomembranas projetadas com 1,0mm de espessura, recomendadas apenas para proteção de taludes possuem carregamento desprezível em relação a resistência do material geossintético e dispensam verificação. A seguir é apresentada a metodologia de verificação utilizada.

INTERPRETAÇÃO DOS TESTES RELATIVOS À APLICAÇÃO DOS MATERIAIS SOBRE A  
GEOMEMBRANA DO DRS1

A determinação da espessura da geomembrana proposta em literatura técnica deve obedecer a equação de KOERNER (1998) apud VERTEMATTI (2015) representada pela Equação 7.1.

$$t = \frac{\sigma_n \times X \times (\tan \delta_u + \tan \delta_l)}{\sigma^{adm} \times \{\cos \alpha - (\sin \alpha \times \tan \delta_l)\}} \quad \text{Equação 7.1}$$

Na qual:

- $\sigma_n$  é a sobrecarga aplicada;
- X: é a distância mobilizadora da geomembrana;
- $\delta_u$ : é o ângulo de atrito entre a geomembrana e o material adjacente (acima), podendo ser solo, geotêxtil, concreto, entre outros. Para líquidos adota-se  $\delta_u = 0$ , para aterro adota-se  $5^\circ < \delta_u < 40^\circ$ ;
- $\delta_l$ : é o ângulo de atrito entre a geomembrana e o material inferior, podendo ser solo, geotêxtil, concreto; entre outros (com variação de  $6^\circ < \delta_l < 40^\circ$ );
- $\sigma^{adm}$ : é a tensão admissível na geomembrana; e
- $\alpha$ : é o ângulo de mobilização da geomembrana com a tensão horizontal.

Essa metodologia de KOERNER é aplicável quando, ao longo da vida útil do revestimento, a geomembrana apresente recalque  $\Delta H$  que formará um ângulo  $\alpha$  no solo de fundação da mesma, que resultará em deformação na geomembrana, gerando assim uma tensão de tração em função da espessura “t” da mesma.

INTERPRETAÇÃO DOS TESTES RELATIVOS À APLICAÇÃO DOS MATERIAIS SOBRE A  
GEOMEMBRANA DO DRS1

Conforme informado pela ALUNORTE durante reunião com a equipe técnica envolvida, a seção de altura máxima de resíduos é equivalente a 44,85 metros.

O relatório técnico do projeto executivo da CL3 (documento RT-3540-54-G-016) descreve com maior detalhe o peso específico do resíduo do filtro tambor e resíduo do filtro prensa. De acordo com o relatório, os parâmetros do filtro tambor no DRS1 foram determinados por meio de ensaios de campo “Vane Test” realizados na região norte e leste do DRS1. Os resultados destes ensaios estão apresentados no documento RT-3540-54-G-366.

- Peso específico ( $\gamma$ ) = 18,25 kN/m<sup>3</sup>
- $S_u$  = 0 na superfície com incremento de 3,5 kPa/m

Os parâmetros do resíduo do filtro prensa foram determinados por meio de ensaios de laboratório realizados simulando possíveis condições de compactação da pilha. Estes parâmetros referem-se aos resultados obtidos de ensaios triaxiais UU, em corpos de prova moldados com grau de compactação de 90% e umidade de 2% acima da ótima. O corpo de prova não foi saturado para a realização do ensaio. Os resultados destes ensaios estão apresentados no documento RT-3540-54-G-366 e replicados abaixo:

- Peso específico ( $\gamma$ ) = 17,41 kN/m<sup>3</sup>
- Coesão ( $c'$ ) = 50 kN/m<sup>2</sup>
- Ângulo de atrito ( $\phi'$ ) = 27°
- $R_u$  (coeficiente de geração de poropressão) = 0,25

Ressalta-se que para o DRS2 o peso específico do resíduo seco proveniente do filtro prensa é de 18,5 kN/m<sup>3</sup>. Considerando que os parâmetros citados acima para o DRS1 foram obtidos em ensaios laboratoriais, é conservador adotar para verificação o peso

		<b>AUDITORIA DE SEGURANÇA</b>
<b>INTERPRETAÇÃO DOS TESTES RELATIVOS À APLICAÇÃO DOS MATERIAIS SOBRE A GEOMEMBRANA DO DRS1</b>		

específico dos resíduos igual a  $18,5 \text{ kN/m}^3$ , pois isso provoca um aumento dos esforços sobre a geomembrana.

Não foi realizado estudo de tensão-deformação para o DRS1 para se estimar as deformações verticais. Esse tipo de estudo, como feito para o DRS2, é usado para “checagem” das deformações esperadas *versus* deformações admitidas pela geomembrana escolhida. Nesse caso, adotou-se para efeito de cálculo e verificação nesse relatório uma deformação máxima equivalente a 22%, idêntica a adotado para o DRS2 conforme documento DB-3541-54-G-319. Com base nos resultados dos deslocamentos verticais máximos ao longo prazo para o DRS2 (Figura 7.3), foi adotado o mesmo deslocamento vertical para o DRS1.

Essa adoção como premissa de cálculo é bastante conservadora uma vez que a altura sobre a geomembrana da pilha de resíduos do DRS2 (64 metros) é superior à do DRS1, de 44,85 metros, altura informada pela ALUNORTE durante reunião com a equipe técnica envolvida. Considerando parâmetros geotécnicos de deformação da fundação similares, é esperado que as maiores deformações ocorram com o aumento da altura da pilha de resíduos. Ciente que quanto maior a deformação da fundação, mais exigida é a geomembrana, para a verificação da geomembrana é conservador supor que a deformação vertical máxima da fundação do DRS1 será igual à do DRS2. A Figura 7.3 apresenta o ângulo de deformação máximo adotado para ambos os depósitos, igual a  $3^\circ$

INTERPRETAÇÃO DOS TESTES RELATIVOS À APLICAÇÃO DOS MATERIAIS SOBRE A GEOMEMBRANA DO DRS1

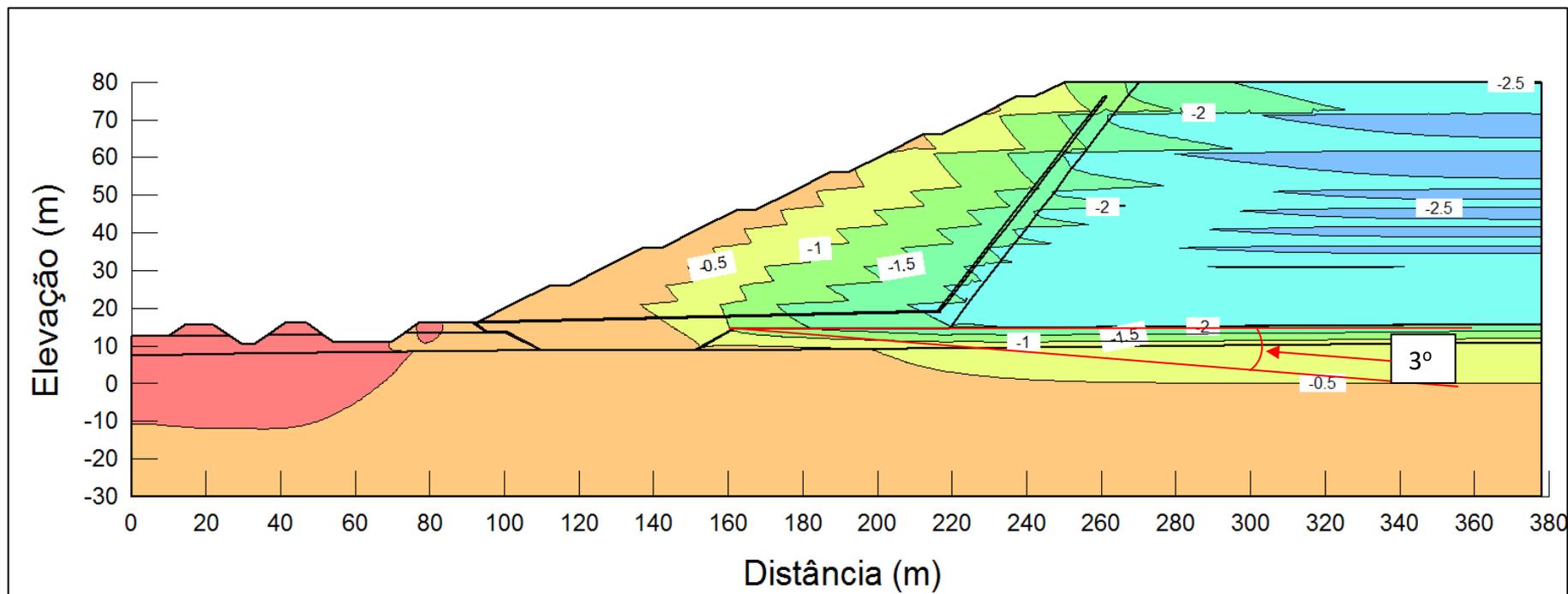


Figura 7.3 – Deslocamentos verticais – longo prazo

**INTERPRETAÇÃO DOS TESTES RELATIVOS À APLICAÇÃO DOS MATERIAIS SOBRE A  
GEOMEMBRANA DO DRS1**

O ângulo de atrito do material sobre a geomembrana (resíduos) considerado para verificação foi de 8°, conforme dados da literatura, e o ângulo de atrito da geomembrana com o solo abaixo dele foi de 3°.

A Tabela 7.5 resume os parâmetros adotados e resultado obtido para a espessura mínima da geomembrana, considerando o trecho sob os resíduos e sobre a camada de areia e o trecho do talude sob os resíduos e sobre o geotêxtil. A espessura é compatível com a espessura da geomembrana utilizada sobre os resíduos no DRS1.

**Tabela 7.5 – Verificação da espessura da geomembrana adotada (geomembrana 1,5mm – sobre geotêxtil)**

<b>Cálculo da Espessura da Geomembrana sobre geotêxtil</b>		
<b>Tensão aplicada pelo peso do material</b>	$\sigma_n$ (kPa)	830,00
<b>Comprimento de mobilização da membrana:</b>	x (m)	0,07000
<b>Ângulo de atrito entre GM e material sobre ela:</b>	$\delta U$ (°)	8,00
<b>Ângulo de atrito entre GM e material embaixo dela:</b>	$\delta dL$ (°)	17,00
<b>Esforço permissível na Geomembrana:</b>	Tadm (kPa)	18.000
<b>Angulo de deformação da fundação</b>	$\beta =$	3,00
<b>Fator de Segurança</b>	Fs	1,00
<b>Espessura mínima da geomembrana - e</b>	(m)	0,00146
	(mm)	1,50

Ressalta-se que, ao 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

INTERPRETAÇÃO DOS TESTES RELATIVOS À APLICAÇÃO DOS MATERIAIS SOBRE A  
GEOMEMBRANA DO DRS1

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.

### 7.2.2.2 Verificação do geotêxtil de proteção para a geomembrana

De acordo com VERTEMATTI (2015), uma das utilizações mais comuns em todo o mundo e, conseqüentemente, a mais estudada é a aplicação de geossintéticos com função protetora, em especial de geomembranas. Assim, é comum utilizar-se geotêxtil na proteção de geomembranas quando instaladas em contato com material contundente (protuberâncias, vegetação, pedregulhos, entre outros).

O aumento da resistência ao puncionamento de uma geomembrana pode ser garantido de duas maneiras:

- Aumentando-se a sua espessura; ou
- Introduzindo-se uma ou duas camadas de um geotêxtil com gramatura adequada de forma a resistir os esforços atuantes.

Aplicando-se a formulação desenvolvida por NAREJO ET AL. (1996) (Equação 7.2), apresentada por KOERNER (1998), para o dimensionamento de geotêxtis para proteção de geomembranas em relação ao puncionamento, tem-se:

$$F_S = \frac{P_{adm}}{P_{base}} \quad \text{Equação 7.2}$$

Na qual,

$P_{BASE}$ : tensão normal atuante sobre a geomembrana; e

		<b>AUDITORIA DE SEGURANÇA</b>
<b>INTERPRETAÇÃO DOS TESTES RELATIVOS À APLICAÇÃO DOS MATERIAIS SOBRE A GEOMEMBRANA DO DRS1</b>		

$P_{ADM}$ : tensão admissível ao funcionamento da geomembrana, calculada conforme a Equação 7.3.

$$P_{adm} = \left[ 450 \times \frac{M}{H^2} \right] \times \frac{1}{MF_s \times MF_{PD} \times MF_A} \times \frac{1}{RF_{CR} \times RF_{CBD}} \quad \text{Equação 7.3}$$

Na qual,

$M$  é a gramatura do geotêxtil ( $g/m^2$ );

$H$  é a altura da protuberância (m);

$MF_A$ ,  $MF_{PD}$  e  $MF_s$  são fatores de forma e espaçamento das protuberâncias e de carga sobre a geomembrana definidos a partir da Tabela 9.1 da Publicação “Manual Brasileiro de Geossintéticos”, VERTEMATTI (2015);

$RF_{CR}$  e  $RF_{CBD}$  são fatores de redução para fluência e degradação do geotêxtil definidos a partir da Tabela 9.2 da Publicação “Manual Brasileiro de Geossintéticos”, VERTEMATTI (2015);

Os resultados do cálculo da gramatura do geotêxtil requerido de acordo com os parâmetros adotados, são apresentados na Tabela 7.6.

**Tabela 7.6 – Cálculo da gramatura do geotêxtil para o DRS1**

FS	$P_{base}$ (kPa)	$P_{adm}$ (kPa)	H (mm)	$FM_s$	$FM_{DR}$	$FM_A$	$FR_{DQB}$	$FR_{FL}$	M ( $g/m^2$ )
<b>3</b>	296.00	888.00	6	0.50	1.00	1.00	1.00	1.5	53.28

FS – Fator de segurança;  $P_{BASE}$  – peso aplicado sobre o material;  $FR_{DQB}$  – Fator de redução;  $FM_s$  – Fatores de modificação (forma da protuberância);  $FM_{DR}$  – espaçamento da protuberância;  $FM_A$  – Sobrecarga.

Uma vez que foi adotado gramatura do geotêxtil de  $400 g/m^2$ , entende-se que foi adotado um valor conservador.

**INTERPRETAÇÃO DOS TESTES RELATIVOS À APLICAÇÃO DOS MATERIAIS SOBRE A  
GEOMEMBRANA DO DRS1****7.2.2.3 Verificação da ancoragem para a geomembrana**

O cálculo da trincheira de ancoragem é determinado através da Metodologia de KOERNER (1998) apud VERTEMATTI (2004), dada pela Equação 7.4.

$$T^{\text{adm}} = \frac{\sigma_n \times L_{RO} \times (\tan \delta_u + \tan \delta_L) - P_A + P_P}{\cos \beta - (\sin \beta \times \tan \delta_L)} \quad \text{Equação 7.4}$$

Na qual,

$\sigma_n$ : peso do material de proteção por metro linear (aterro);

$\delta_u$ : ângulo de atrito entre a geomembrana e o material adjacente (acima), no caso do DRS1 sendo uma camada de 0,07m de areia;

$T^{\text{adm}}$ : tensão admissível na geomembrana (18.000,00 kPa);

$L_{RO}$ : comprimento de desenvolvimento antes da descida na trincheira de ancoragem;

$\delta_u$  : ângulo de atrito entre a geomembrana e o material adjacente (acima), no caso do DRS1 sendo uma camada de 0,07m de areia;

$\delta_L$ : ângulo de atrito entre a geomembrana e o material inferior;

$\beta$  é o ângulo de mobilização da geomembrana com a tensão horizontal (inclinação do talude de 1,50H: 1,00 V) (33,69°);

$P_A$ : tensão ativa contra o material de preenchimento da trincheira de ancoragem dada pela Equação 7.5; e

$P_P$ : tensão passiva contra o material de preenchimento da trincheira de ancoragem dada pela Equação 7.6.

**INTERPRETAÇÃO DOS TESTES RELATIVOS À APLICAÇÃO DOS MATERIAIS SOBRE A  
GEOMEMBRANA DO DRS1**

$$P_A = (0,50 \times \gamma_{\text{aterro}} \times d_{\text{aterro}} + \sigma_n) \times K_A \times d_{\text{aterro}} \quad \text{Equação 7.5}$$

$$P_P = (0,50 \times \gamma_{\text{aterro}} \times d_{\text{aterro}} + \sigma_n) \times K_P \times d_{\text{aterro}} \quad \text{Equação 7.6}$$

Em que,

$d_{\text{aterro}}$  :profundidade da trincheira;

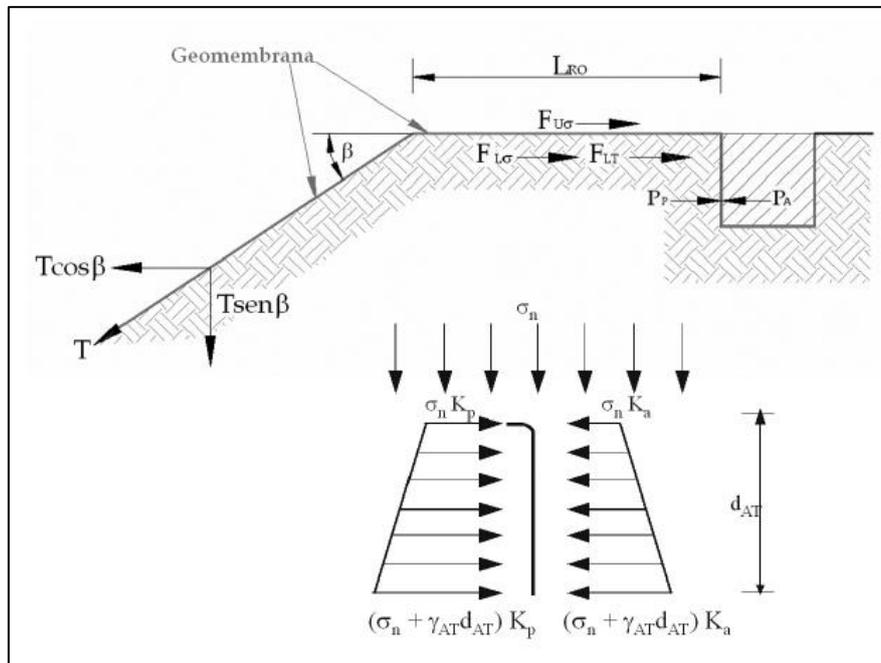
$\gamma_{\text{aterro}}$ : peso específico do aterro de preenchimento da trincheira;

$\sigma_n$  : esforço normal aplicado pela sobrecarga (peso do aterro da trincheira);

$K_A$  :coeficiente de empuxo ativo;

$K_P$  :coeficiente de empuxo passivo;

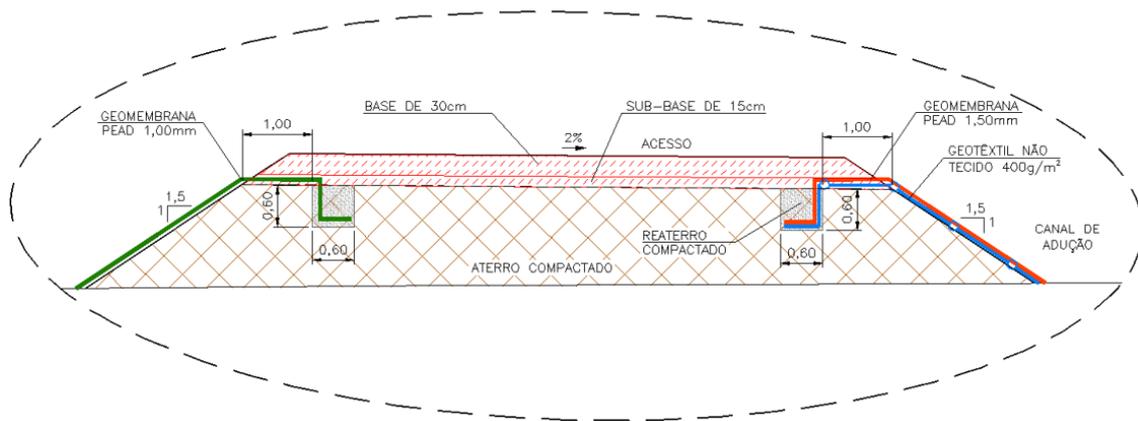
A Figura 7.4 apresenta o diagrama de forças atuantes na ancoragem.



**Figura 7.4 – Diagrama de forças atuantes em uma ancoragem por trincheira.**

**INTERPRETAÇÃO DOS TESTES RELATIVOS À APLICAÇÃO DOS MATERIAIS SOBRE A  
GEOMEMBRANA DO DRS1**

A especificação técnica de recebimento, aceitação e instalação de sistema de impermeabilização para bacias e canais (documento ES-3542-54-G-002) apresenta seção típica da ancoragem indicada tanto para o DRS1 quanto para o DRS2.



**Figura 7.5 – Detalhe típico de crista de dique externo de canal de adução**

Os parâmetros do aterro compactado considerados para a verificação foram apresentados no item 7.2.2.1 e são replicados abaixo:

- Peso Específico ( $\gamma_{\text{aterro compactado}}$ ): 19,50 kN/m<sup>3</sup>;
- Coesão ( $c'$ ): 5,00 KPa;
- Ângulo de atrito ( $\phi'$ ): 28,00°.

Assim, para o esforço normal atuante na trincheira, considerou-se o material do aterro que apresenta peso específico de 19,5 kN/m<sup>3</sup>, têm-se:

$$\gamma_{\text{aterro}} = 19,5 \text{ kN/m}^3 \rightarrow \sigma_n = 19,5 \times d_{\text{aterro}}$$

		<b>AUDITORIA DE SEGURANÇA</b>
<b>INTERPRETAÇÃO DOS TESTES RELATIVOS À APLICAÇÃO DOS MATERIAIS SOBRE A GEOMEMBRANA DO DRS1</b>		

Para o ângulo de atrito do material de aterro de 28,00°, os coeficientes de empuxo ativos são determinados a partir das Equação 7.7.

$$K_A = \operatorname{tg}^2\left(45^\circ - \frac{\phi'}{2}\right)$$

$$K_P = \operatorname{tg}^2\left(45^\circ + \frac{\phi'}{2}\right)$$

Equação 7.7

Os valores de empuxo ativo e passivo são apresentados na Tabela 7.7

**Tabela 7.7 – Cálculo dos empuxos ativo e passivo**

Cálculos dos Empuxos ativos e passivos				
$\phi'_{\text{aterro}} (^\circ)$	$45^\circ - \phi'/2$	$45^\circ + \phi'/2$	$K_A$	$K_P$
28,00	31	59	<b>0,36</b>	<b>2,77</b>

Para o cálculo das tensões ativas e passivas representadas nas equações 6.5 e 6.6 temos:

- Tensão Ativa:  $P_A = 10,56 \times d_{\text{aterro}}^2$
- Tensão Passiva:  $P_P = 81,02 \times d_{\text{aterro}}^2$

O ângulo de atrito entre a geomembrana e o material imediatamente acima formado por resíduos de filtro prensa apresenta ângulo igual a 27,00° ( $\delta_u = 27,00^\circ$ ). Já para o contato entre a geomembrana e o material inferior formado por geotêxtil (nos taludes) e areia na base da CL3 apresenta ângulo de 8° e 17°, respectivamente. Adotou-se o ângulo de 8°, considerando o cenário crítico para a trincheira utilizada ( $\delta_L = 8,00^\circ$ ).

Aplicando os valores obtidos na Equação 7.4 têm-se:

INTERPRETAÇÃO DOS TESTES RELATIVOS À APLICAÇÃO DOS MATERIAIS SOBRE A  
GEOMEMBRANA DO DRS1

$$24,12 = 12,67 \times d_{\text{aterro}} \times L_{\text{RO}} + 70,46 \times d_{\text{aterro}}^2 \quad (1)$$

Para a determinação do comprimento de ancoragem da geomembrana, foi considerado o  $L_{\text{RO}}$  apresentado na especificação técnica de instalação da geomembrana (documento ES-3542-54-G-002, Figura 7.5), representando um comprimento de  $L_{\text{RO}} = 1,0\text{m}$ .

A partir desta consideração, foi realizado o cálculo mínimo da vala de ancoragem. Substituindo os valores obtidos em (1) temos a seguinte equação do 2º Grau:

$$70,46 \times d_{\text{aterro}}^2 + 12,67 d_{\text{aterro}} - 24,12 = 0$$

Resolvendo a equação de 2º Grau:

$$d_{\text{aterro}} = \frac{-12,67 \pm 83,41}{140,91} \Leftrightarrow \Leftrightarrow \begin{cases} d_{\text{aterro}} = 0,502 \text{ metros} \\ d_{\text{aterro}} = -0,60 \text{ metros (não aplicável)} \end{cases}$$

Portanto, a profundidade mínima a ser utilizada para a trincheira de ancoragem para a geomembrana do DRS1 é de 0,502m. Logo, entende-se que a adoção de 0,60m conforme apresentada na especificação técnica de instalação da geomembrana (ES-3542-54-G-002) está adequada.

## 8. CONCLUSÕES

Após verificação das propriedades da geomembrana e geotêxtil utilizado, foi possível realizar a 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 presente relatório também foi identificado que a gramatura do geotêxtil de proteção ao puncionamento está dimensionada de forma conservadora e a vala de ancoragem da geomembrana está adequada.

Conforme apresentado no item 7.1, as células mais antigas não dispunham de alguns dados essenciais para revisão dos testes relativos a aplicação dos materiais sobre a geomembrana, por isso, o estudo realizado nesse relatório 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 é apresentada com detalhes no relatório FG-2201-NHB-RT07, que compreende a letra D do TAC 3.1.

INTERPRETAÇÃO DOS TESTES RELATIVOS À APLICAÇÃO DOS MATERIAIS SOBRE A  
GEOMEMBRANA DO DRS1

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

## 9. REFERÊNCIAS

- i. ALMARAZ, U. J. S. (1977). Aspectos Geoquímicos e Ambientais dos Calcários do Formação Pirabas, Pará. Tese de Doutorado, UFRS, 272 p.
- ii. BRASIL, Lei 12.305 – Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília, 2010.
- iii. BRASIL, Lei 12.651 – Código Florestal Brasileiro. Brasília, 2012.
- iv. 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.
- v. 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.
- vi. IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Barcarena/PA. População. 2010. Disponível em <[IBGE | Cidades@ | Pará | Barcarena | Panorama](#)>
- vii. \_\_\_\_\_. Barcarena/PA. Educação. 2010b. Disponível em <[IBGE | Cidades@ | Pará | Barcarena | Panorama](#)>
- viii. \_\_\_\_\_. Barcarena/PA. Economia. 2019. Disponível em <[IBGE | Cidades@ | Pará | Barcarena | Panorama](#)>
- ix. \_\_\_\_\_. Barcarena/PA. Trabalho e Rendimento. 2020. Disponível em <[IBGE | Cidades@ | Pará | Barcarena | Panorama](#)>
- x. \_\_\_\_\_. Barcarena/PA. Território e ambiente. 2021. Disponível em <[IBGE | Cidades@ | Pará | Barcarena | Panorama](#)>
- xi. KOERNER, ROBERT (1998). "Designing with Geosynthetics". Xlibris Corporation. 6ta Edição. Vol 2. New Jersey, USA. 914pp.

INTERPRETAÇÃO DOS TESTES RELATIVOS À APLICAÇÃO DOS MATERIAIS SOBRE A  
GEOMEMBRANA DO DRS1

- xii. MABESOONE, J. M. e CASTRO, C. (1975). Desenvolvimento Geomorfológico do Nordeste Brasileiro. Boletim do Núcleo Nordeste da SBG, Recife, v.3, p. 05- 35.
- xiii. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Resolução CONAMA Nº 237**, de 19 de dezembro de 1997.
- xiv. NAREJO, D.; KOERNER, R.M.; WILSON FAHMY, R.F. **Puncture protection of geomembranes. Part II: experimental.** Geosynthetics International 3(5): 629-653 1996
- 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](http://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