

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 **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**, em atendimento à letra “H” do Termo de Compromisso de Ajustamento de Conduta, celebrado entre a HYDRO, ALUNORTE e o Ministério Público do Estado do Pará (MPPA), Ministério Público Federal (MPF), o Estado do Pará e a Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade do Estado do Pará. O DRS2 está localizado junto a produção da Alunorte, no município de Barcarena – PA.

À disposição para esclarecimentos julgados necessários,

Belo Horizonte, 03 de agosto de 2023

Atenciosamente,



Michel Fontes  
DIRETOR  
FONNTES GEOTÉCNICA

# RELATÓRIO TÉCNICO DE AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS2

CLIENTE:



PROJETO:

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

**BARCARENA - PA**



Agosto/2023

**AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS2**

REV.	DATA	POR	REVISÃO	APROV.	DESCRIÇÃO DE REVISÕES
0	06/06/22	BSC/RCM /RCJ	ACS/ BCN/ MV	ACS	EMISSÃO INICIAL
1	15/03/23	BSC/RCM /RCJ	ACS/ BCN/ MV	ACS	ATENDIMENTO À COMENTÁRIOS
2	03/08/23	BSC/RCM /RCJ	ACS/ BCN/ MV	ACS	APROVADO

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

**TE – TIPO DE EMISSÃO**

(A) PRELIMINAR	(E) PARA CONSTRUÇÃO
(B) PARA APROVAÇÃO	(F) CONFORME COMPRADO
<b>(C) PARA CONHECIMENTO</b>	(G) CONFORME CONSTRUÍDO
(D) PARA COTAÇÃO	(H) CANCELADO

**AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS2****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 DO PROJETO DA ESTRUTURA.....</b>	<b>9</b>
5.1 LOCALIZAÇÃO .....	11
5.2 ASPECTOS GEOLÓGICOS .....	16
5.2.1 <i>Geologia Regional</i> .....	16
5.2.2 <i>Histórico de Investigações</i> .....	18
5.2.3 <i>Geologia Local</i> .....	19
5.3 PLATAFORMA DA PILHA DE RETOMADA DO RESÍDUO E CÉLULA DE CONTINGÊNCIA.....	20
5.4 CANAIS DE CONTORNO E BACIAS DE CONTROLE (BC 201 E BC 202) .....	21
5.5 DIQUE DE CONTORNO.....	23
5.6 DIQUE ENTRE CANAL DE CONTENÇÃO DE SEDIMENTOS E CANAL DE ADUÇÃO DAS BACIAS DE CONTROLE .....	23
5.7 DIQUE EXTERNO DO CANAL DE ADUÇÃO DAS BACIAS DE CONTROLE .....	23
5.8 DIQUE EXTERNO DAS BACIAS DE CONTROLE (BC 201 E BC 202) .....	24
5.9 DIQUE DE CONTENÇÃO DA ÁREA ÚMIDA (INFRAESTRUTURA INICIAL).....	24
5.10 DIQUE CENTRAL E FINGERS (INFRAESTRUTURA INICIAL).....	25
5.11 SISTEMA DE IMPERMEABILIZAÇÃO.....	26
5.12 DRENAGEM INTERNA DA PILHA .....	27
5.13 INSTRUMENTAÇÃO.....	29
5.14 SISTEMA EXTRAVASOR.....	30
5.15 GALERIA DE TRANSPOSIÇÃO DO CANAL DE ADUÇÃO .....	31
5.16 DRENAGEM SUPERFICIAL .....	31
5.17 PROJETO <i>AS BUILT</i> .....	31
<b>6. METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO .....</b>	<b>32</b>
<b>7. DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO.....</b>	<b>33</b>
7.1 ENSAIOS DE LABORATÓRIO.....	33
7.1.1 <i>Campanha WS GEOTECNICA (2011)</i> .....	34

**AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS2**

7.1.2	<i>Campanha LOCTEST (2014)</i> .....	36
7.1.3	<i>Campanha GEOMECÂNICA (2015)</i> .....	36
7.1.4	<i>Campanha GEOMECÂNICA (2016)</i> .....	39
7.2	PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA ADOTADOS NO RISR DO 2º CICLO/2021 .....	41
7.3	AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA DOS PARÂMETROS .....	43
7.3.1	<i>Fundação Fofa</i> .....	43
7.3.2	<i>Fundação Densa</i> .....	46
7.3.3	<i>Resíduo da Zona estrutural</i> .....	50
7.3.4	<i>Resíduo da Zona interna</i> .....	52
7.3.5	<i>Aterro</i> .....	55
<b>8.</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>56</b>
<b>9.</b>	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>58</b>

		<b>AUDITORIA DE SEGURANÇA</b>
<b>AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS2</b>		

## GLOSSÁRIO

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

		<b>AUDITORIA DE SEGURANÇA</b>
<b>AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS2</b>		

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

## 1. INTRODUÇÃO

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



Figura 1.1 – Localização do empreendimento.

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



		<b>AUDITORIA DE SEGURANÇA</b>
<b>AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS2</b>		

IC nº 001/2018 - MP (SIMP nº000654 -710/2018) MPPA, Inquérito Civil nº 000980 - 040/2018 (Portaria no 12/2018) MPPA, Inquérito Civil no 1.23.000.000498/2018 - 98 MPF.

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

- a) Compatibilidade do projeto executivo dos depósitos (DRS1 e DRS2) com a sua efetiva execução;
- b) Compatibilidade dos Depósitos de Resíduos Sólidos (DRS1 e DRS2) com a Lei Nacional de Segurança de Barragens (Lei nº 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 DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS2

- 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

## AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS2

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 **h)**, referido à avaliação do teor de umidade do material a ser lançado no DRS2.

## 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 **“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;”** para o depósito de rejeitos DRS2.

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

		<b>AUDITORIA DE SEGURANÇA</b>
<b>AValiação DOS PARâMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS2</b>		

abordagem em outras letras do TAC 3.1 ou ainda em outras clausulas que não eram escopo do presente trabalho. Abaixo é reproduzido o extrato do ofício com a explicação do entendimento para resposta da pergunta **letra H)**, objeto desse relatório.

*Inicialmente é importante esclarecer que a coesão e ângulo de atrito efetivo são determinados através de ensaios de laboratório (ensaios triaxiais), realizados a partir de amostras indeformadas coletadas no material a que se quer estudar sua resistência. Ensaios de campo também podem ser utilizados para determinar desses parâmetros, entretanto, de forma indireta (correlações empíricas), pois são menos precisos que os ensaios de laboratório.*

*Assim, propõe-se que a avaliação seja realizada exclusivamente do banco de dados de ensaios de laboratório, que são a medidas diretas e mais confiáveis para a resistência dos materiais, coesão e ângulo de atrito efetivo. Através do banco de dados disponível será realizado a avaliação do valor médio e desvio padrão. Esse estudo será realizado para cada tipo de material que se tiver ensaios, por exemplo, resíduos compactados, diques de contorno executados com solo compactados, fundação, etc.*

### **3. DADOS UTILIZADOS**

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

**Tabela 3.1 – Documentos utilizados para elaboração desse relatório**

**AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS2**

<b>CÓDIGO</b>	<b>TÍTULO DO DOCUMENTO</b>	<b>ELABORADO POR</b>	<b>DATA</b>
RT-3541-54-G-292-R01	RELATÓRIO TÉCNICO DE INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS DE ENSAIOS DE LABORATÓRIO – FILTRO TAMBOR	PIMENTA DE AVILA	09/03/2016
RT-3541-54-G-095 R03	RELATÓRIO DE CONSOLIDAÇÃO DE DADOS PROJETO DETALHADO DA FASE 1 DO DRS2 PARA DISPOSIÇÃO DO RESÍDUO DO FILTRO PRENSA	PIMENTA DE AVILA	15/09/2015
RT-3541-54-G-292-R01	INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE LABORATÓRIO REALIZADOS NAS AMOSTRAS DE RESÍDUO DE FILTRO TAMBOR	PIMENTA DE AVILA	09/03/2016
RT-3541-54-G-293-R01	INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE LABORATÓRIO REALIZADOS NAS AMOSTRAS DE RESÍDUO DA ÁREA TESTE (PISTA EXPERIMENTAL)	PIMENTA DE AVILA	09/03/2016
O Relatório RT-5186-54-G-002	ENSAIOS GEOTÉCNICOS DE LABORATÓRIO NO TERRENO DE FUNDAÇÃO DO DRS 2 – RELATÓRIO TÉCNICO	GEOMECÂNICA	29/01/2016
RT-5186-54-G-005	ENSAIOS GEOTÉCNICOS DE LABORATÓRIO NOS BLOCOS INDEFORMADOS DO TERRENO DE FUNDAÇÃO DO DRS 2	GEOMECÂNICA	23/06/2016
RT-5186-54-G-007	ENSAIOS GEOTÉCNICOS DE LABORATÓRIO NO TERRENO DE FUNDAÇÃO DO DRS 2 – RELATÓRIO TÉCNICO	GEOMECÂNICA	29/01/2016
RT-469137-54-G-0002-R003	RELATÓRIO DE INSPEÇÃO DE SEGURANÇA REGULAR DO DEPÓSITO DRS2 DE 2022	GEOCOLSULTORIA	04/02/2022
DB-3541-54-G-319-R1	RELATÓRIO DE MEMÓRIA DE CÁLCULO DAS ANÁLISES GEOTÉCNICAS	PIMENTA DE AVILA	26/02/2018

#### **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

		<b>AUDITORIA DE SEGURANÇA</b>
<b>AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS2</b>		

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 DO PROJETO DA ESTRUTURA**

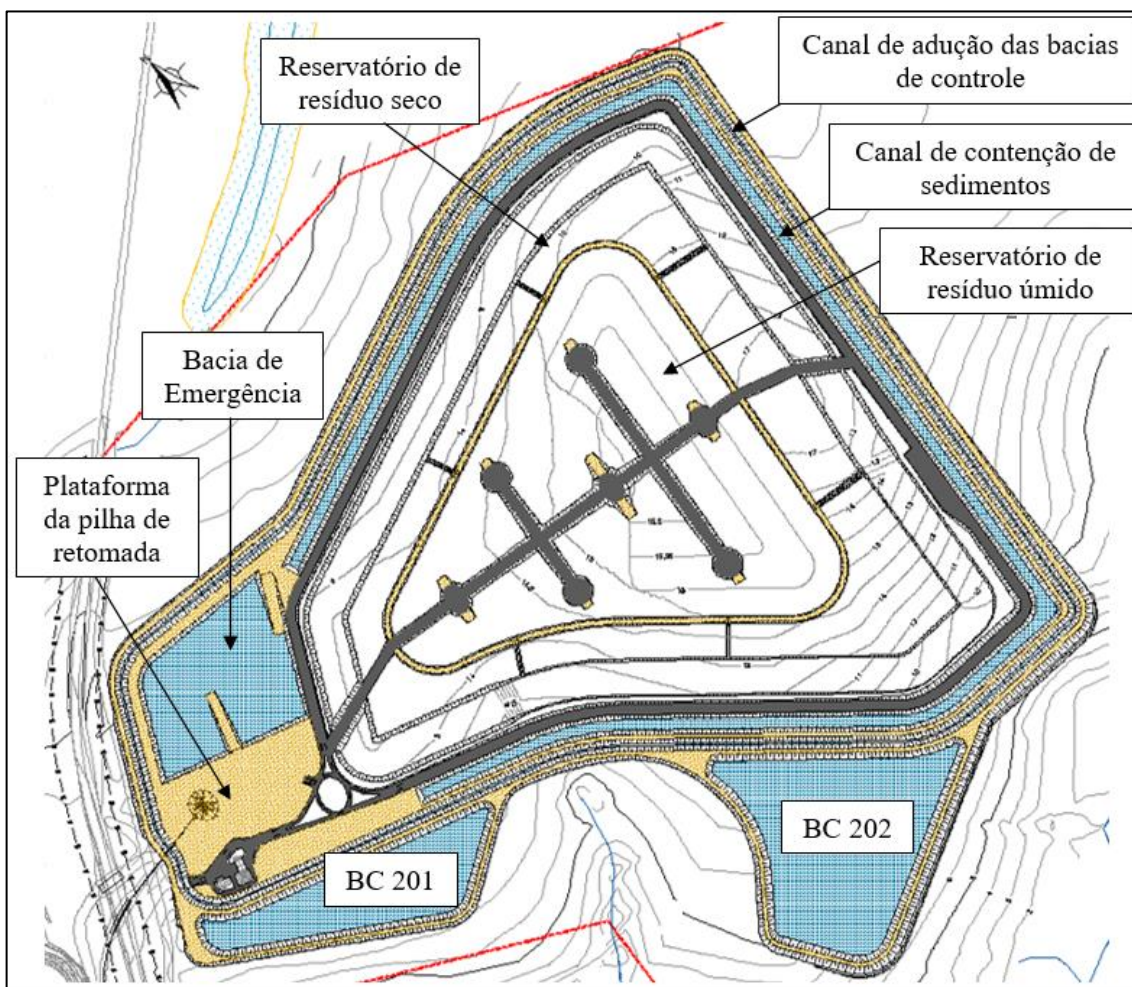
O DRS2 foi projetado para armazenar resíduo da produção de alumina (gerado pela refinaria da ALUNORTE) depois de filtrado por filtros prensa. Na Figura 5.1 é apresentado o Layout da fase 1 (fase atual) do DRS2, o qual é constituído de:

- Reservatório de resíduo úmido;

**AValiação DOS PARâMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS2**

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

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



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

		<b>AUDITORIA DE SEGURANÇA</b>
<b>AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS2</b>		

Neste item será apresentada a localização do depósito de resíduos sólidos DRS2 e em, seguida o mesmo será caracterizado de acordo com o Memorial Descritivo do projeto detalhado do DRS2 Fase 01, documento MD-3541-54-G-096, elaborado pela Pimenta de Ávila Consultoria, revisão 17 de setembro de 2015. Para caracterização da estrutura também é utilizado o relatório As Built do projeto detalhado do DRS2, elaborado pela Pimenta de Ávila Consultoria LTDA, documento RT-3541-54-G-360 R01, revisão 01 de julho de 2018. Ressalta-se aqui que apenas a fase 01 do DRS2DRS2 foi executada até o momento.

## **5.1 LOCALIZAÇÃO**

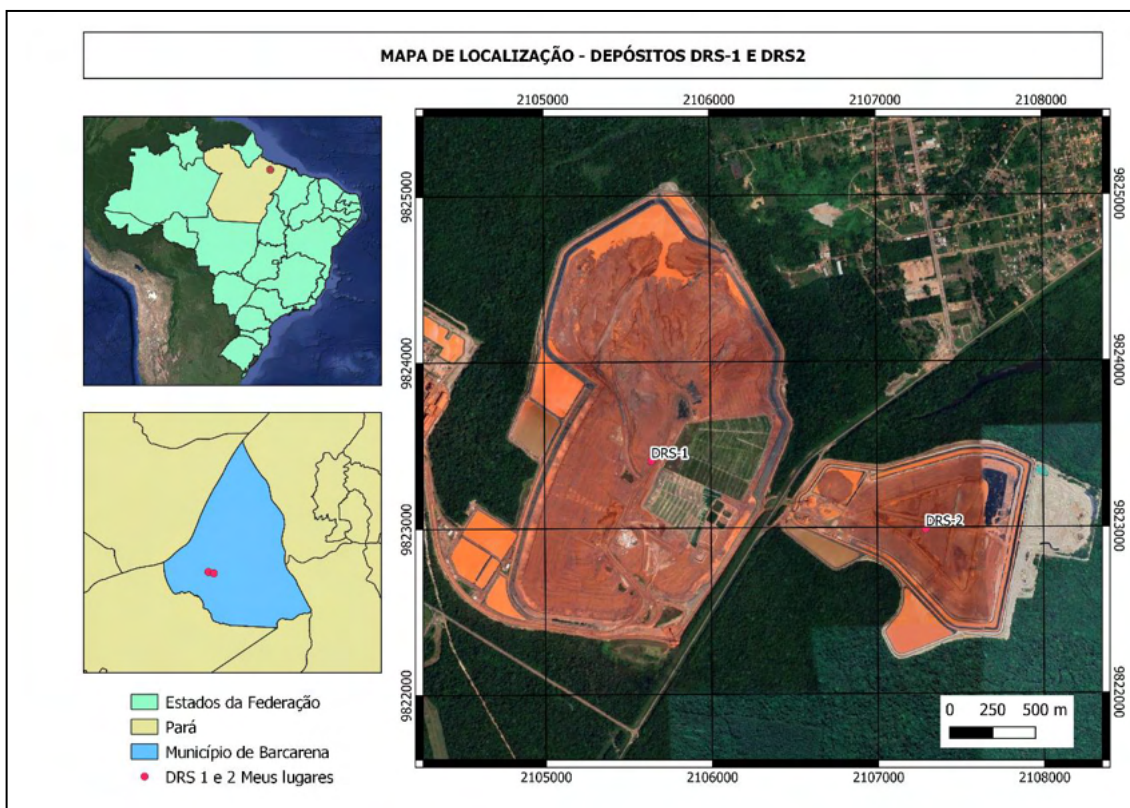
Localizado no município de Barcarena, no estado do Pará, o sistema de disposição de resíduos pertencente à ALUNORTE é composto pelos Depósitos de Resíduos Sólidos DSR1 e DSR2 e situa-se em torno das coordenadas UTM/DATUM SIRGAS 2000 754.812m E e 9.828.482m S.

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

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

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



**AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS2**


**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 habitantes por quilômetro quadrado. Conforme Figura 5.3, identificam-se as comunidades Água Verde, Cabeceira Grande, Caravelas 1, Caravelas 2 Jardim das Palmeiras, Laranjal, Massarapó, Nazaré, Nestor Campos e Vila São Francisco.

AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS2

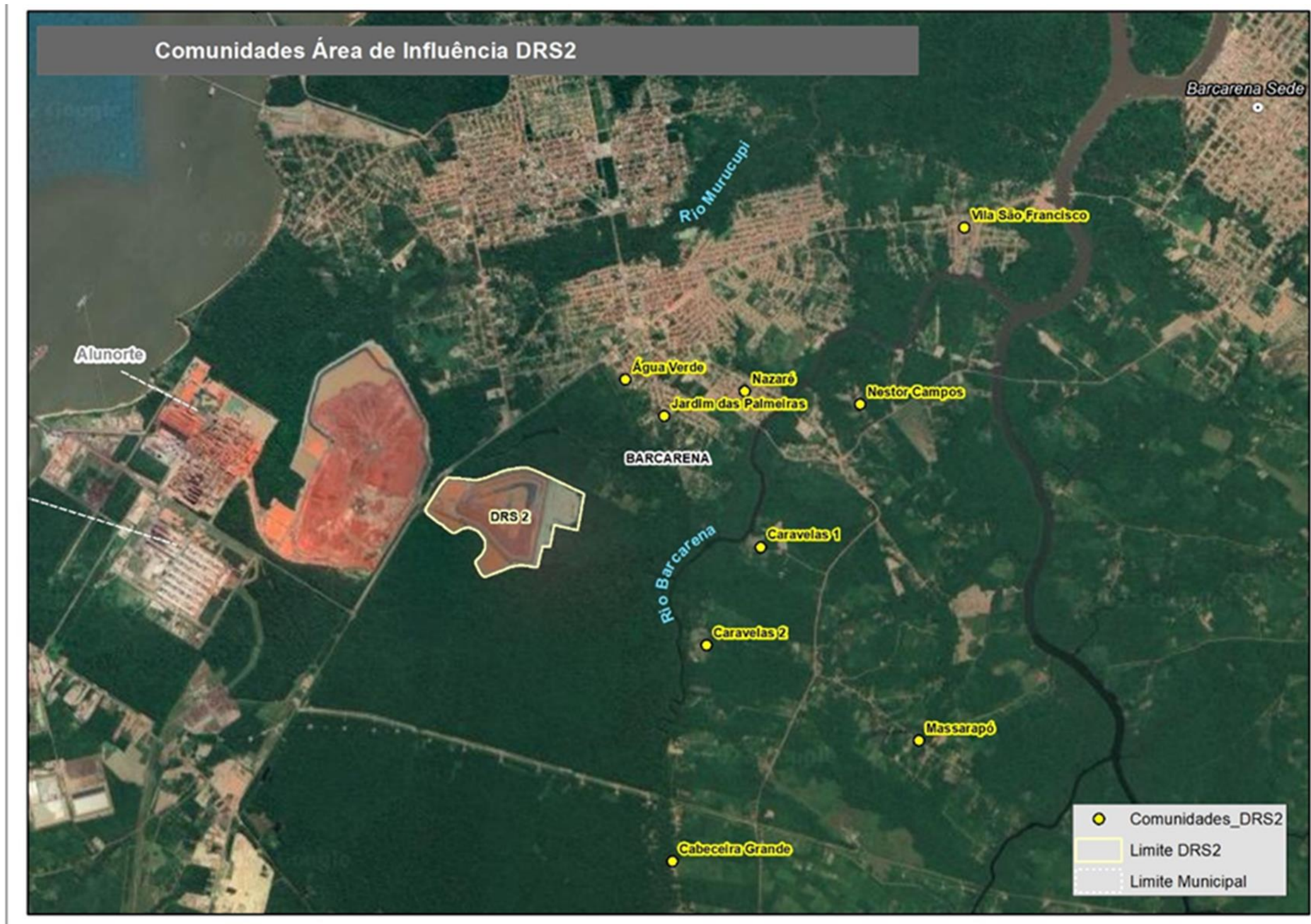


Figura 5.3 – Localização das comunidades próximas ao depósito e DRS2 (Imagem fornecida pela equipe técnica da HYDRO/ALUNORTE)

		<b>AUDITORIA DE SEGURANÇA</b>
<b>AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS2</b>		

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 DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS2**



**Figura 5.4 – Histórico de expansão do DRS1 e DRS2**

		<b>AUDITORIA DE SEGURANÇA</b>
<b>AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS2</b>		

A descrição das estruturas do DRS2 é apresentada a seguir com base no memorial descritivo do projeto (MD-3541-54-G-096) e relatório As Built (RT-3541-54-G-360 R01\_AN-561-RL-47252-00).

## 5.2 ASPECTOS GEOLÓGICOS

### 5.2.1 Geologia Regional

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

Conforme apresentado no Mapa Geológico do Estado do Pará, desenvolvido pela CPRM em 2008 (Figura 5.5), a estrutura DRS2 encontra-se sobre Sedimentos Pós-Barreiras.

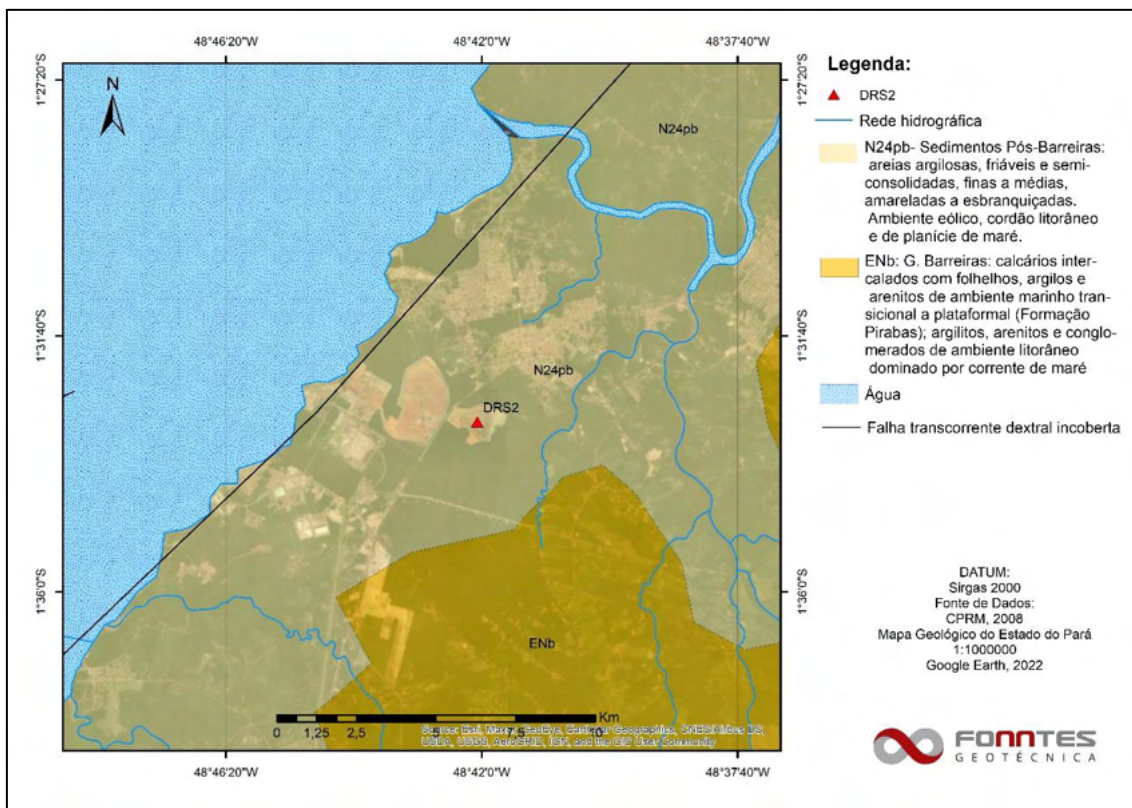
Ocupando uma área de aproximadamente 12000 m<sup>2</sup>, que se estende à faixa litorânea entre as cidades de Bragança e Belém avançando para o interior do Pará, a Formação Pirabas ocorre sobreposta ao embasamento cristalino (ALMARAZ, 1977) e é caracterizada pela composição calcária e conteúdo fossilífero. A deposição se fez por evento transgressivo decorrente da subida do nível do mar em todo o planeta, durante o Mioceno (HAQ et al. 1987). Sucedendo ao evento transgressivo que resultou na Formação Pirabas, ocorreu um evento de caráter regressivo o qual foi responsável pela sedimentação do Grupo Barreiras.

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

**AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS2**

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

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



**Figura 5.5 – Mapa geológico regional da estrutura DRS2**

O relatório “As Is” RT-3540-54-G-1014 desenvolvido pela Pimenta de Ávila, apresenta as estruturas DRS1 e DRS2 inseridas sobre domínios da Formação/Grupo Barreiras, enquanto a Figura 5.5 indica que as duas estruturas estão inseridas sobre Sedimentos

		<b>AUDITORIA DE SEGURANÇA</b>
<b>AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS2</b>		

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

### 5.2.2 Histórico de Investigações

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

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

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

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

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

		<b>AUDITORIA DE SEGURANÇA</b>
<b>AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS2</b>		

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

### 5.2.3 Geologia Local

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

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

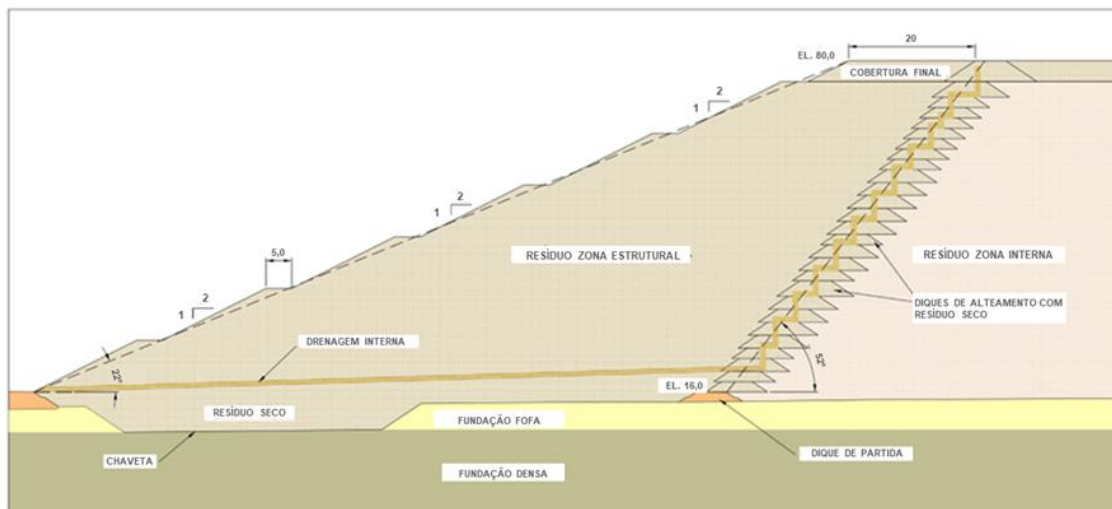
O horizonte superior é caracterizado por siltes arenosos de coloração variada, e pode ser dividida em subhorizontes superior e inferior, sendo o primeiro constituído por siltes arenosos de compactidade fofa e NSPT menores que 5 golpes. O subhorizonte inferior apresenta características semelhantes ao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

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

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

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



**AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS2**


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

### 5.3 PLATAFORMA DA PILHA DE RETOMADA DO RESÍDUO E CÉLULA DE CONTINGÊNCIA

A plataforma da pilha de retomada de resíduo para disposição no DRS2 foi projetada na El. 16,0 m, com área em planta de cerca de 49.900 m<sup>2</sup>.

A Célula de Contingência foi projetada para receber resíduo em condições de umidade extremamente elevadas. Tendo em vista que elevada umidade impossibilitaria a sua disposição por meio de espalhamento com trator de esteiras. Foi prevista crista na El. 16,0 m e fundo com elevação variável em torno da EL. 11,0 m, área em planta de cerca de 48.500 m<sup>2</sup>, taludes de montante com inclinação 1V:1,5H e volume de armazenamento de aproximadamente 199.483 m<sup>3</sup> de resíduo “super úmido”. A Célula de Contingência é apresentada na Figura 5.7.



**Figura 5.7 – Célula de Contingência**

#### **5.4 CANAIS DE CONTORNO E BACIAS DE CONTROLE (BC 201 E BC 202)**

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

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

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

**AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS2**

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



**Figura 5.8 – Canal de contorno adjacente ao DRS2**

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

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

**AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS2**

A bacia de controle BC 201 tem uma área de cerca de 34.585 m<sup>2</sup> de fundo, taludes 1V:1,5H, crista na elevação 15,50 m e fundo na elevação 9,00 m. Possui um volume total de 258.129 m<sup>3</sup>. Já a BC 202 tem uma área de cerca de 65.301 m<sup>2</sup> de fundo, taludes 1V:1,5H, crista na elevação 15,50 m e fundo na elevação 9,00 m, perfazendo um volume total de 463.201 m<sup>3</sup>.

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

### **5.5 DIQUE DE CONTORNO**

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

### **5.6 DIQUE ENTRE CANAL DE CONTENÇÃO DE SEDIMENTOS E CANAL DE ADUÇÃO DAS BACIAS DE CONTROLE**

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

### **5.7 DIQUE EXTERNO DO CANAL DE ADUÇÃO DAS BACIAS DE CONTROLE**

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



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

### **5.8 DIQUE EXTERNO DAS BACIAS DE CONTROLE (BC 201 E BC 202)**

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

### **5.9 DIQUE DE CONTENÇÃO DA ÁREA ÚMIDA (INFRAESTRUTURA INICIAL)**

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

### 5.10 DIQUE CENTRAL E FINGERS (INFRAESTRUTURA INICIAL)

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

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

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



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

### **5.11 SISTEMA DE IMPERMEABILIZAÇÃO**

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

Para proteção da geomembrana quanto ao puncionamento por qualquer material pontiagudo que possa existir nas áreas de aterro e de terreno natural que ela cobrirá, nos taludes foi instalado, sob a geomembrana, geotêxtil não tecido de gramatura igual a 400g/m<sup>2</sup> e, no fundo do reservatório, das bacias e do canal de contenção de sedimentos, a geomembrana estará sobre uma camada de 7,0 cm de areia.

## AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS2

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

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

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

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

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

### 5.12 DRENAGEM INTERNA DA PILHA

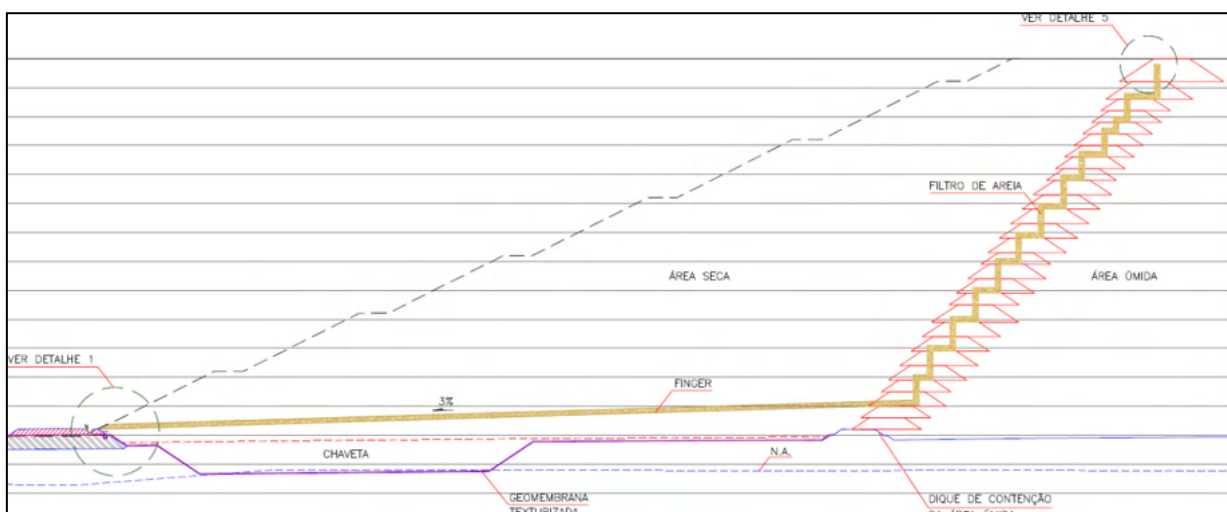
Segundo o memorial descritivo, o sistema de drenagem interna foi previsto ser implantado quando a pilha de resíduo atingir a elevação 16 m, ou seja, a borda do dique de contorno. Consiste em drenos transversais, espaçados de 10 m entre si, de seção



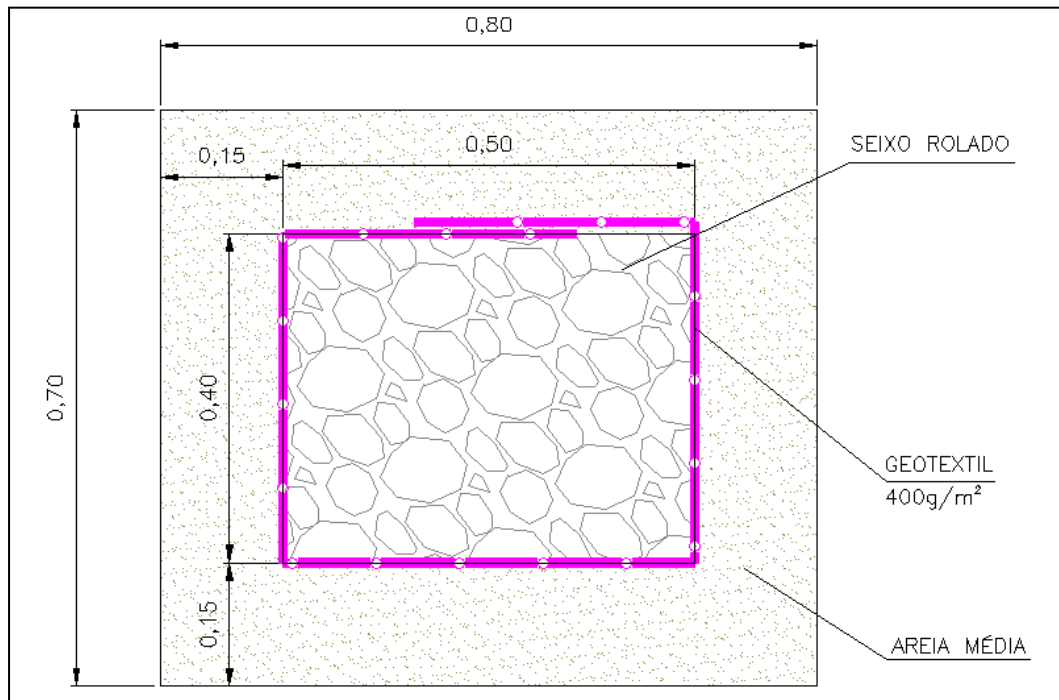
**AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS2**

retangular de 0,60 m por 0,40 m de seixo rolado, envolto por geotêxtil e uma camada de 0,15 m de areia média. A função dos drenos é conduzir o fluxo de água interno da pilha, da área úmida até a crista do dique de contorno da área seca, com declividade de 2%, evitando assim a saturação da zona estrutural da pilha. A água proveniente dos drenos é coletada pela canaleta do dique de contorno, de onde segue o fluxo de efluentes até as bacias de controle.

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



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

**AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS2**


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

### 5.13 INSTRUMENTAÇÃO

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

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

#### 5.14 SISTEMA EXTRAVASOR

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

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

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

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

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

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

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

**AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS2**

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

**5.15 GALERIA DE TRANSPOSIÇÃO DO CANAL DE ADUÇÃO**

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

**5.16 DRENAGEM SUPERFICIAL**

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

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

**5.17 PROJETO AS BUILT**

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

## AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS2

- Escavação e remoção de material fofo, nas áreas que posteriormente receberam o aterro dos diques;
- Escavação e remoção de material fofo, na região da chaveta.
- Ensaios de caracterização de resistência do concreto moldado in loco, e atualização de cotas, medidas etc., das estruturas de concreto dos extravasores.
- Execução de camada de geotêxtil e tapete de areia sob a geomembrana.

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

## 6. METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO

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

*Inicialmente é importante esclarecer que a coesão e ângulo de atrito efetivo são determinados através de ensaios de laboratório (ensaios triaxiais), realizados a*

## AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS2

*partir de amostras indeformadas coletadas no material a que se quer estudar sua resistência. Ensaios de campo também podem ser utilizados para determinação desses parâmetros, entretanto, de forma indireta (correlações empíricas), pois são menos precisos que os ensaios de laboratório.*

*Assim, neste relatório será realizada a avaliação exclusivamente do banco de dados de ensaios de laboratório, que são a medidas diretas e mais confiáveis para a resistência dos materiais, coesão e ângulo de atrito efetivo. Através do banco de dados disponível será realizado a avaliação do valor médio e desvio padrão. Esse estudo será realizado para cada tipo de material que se tiver ensaios, por exemplo, resíduos compactados, diques de contorno executados com solo compactados, fundação, etc. Uma breve comparação entre os valores médios dos parâmetros e os valores adotados no projeto também é realizada.*

Destaca-se que o trecho anterior foi reproduzido do ofício elaborado pela FONNTES e direcionado ao MP-PA (protocolo PR-PA-00011706/2022 em 16 de março de 2022). No entanto, além dos ensaios triaxiais, foram avaliados os demais ensaios de laboratório disponibilizados à FONNTES, incluindo ensaios de caracterização (granulometria completa, limites de Atterberg, densidade real dos grãos, umidade natural, densidade natural etc.), ensaios de permeabilidade, cisalhamento direto e adensamento. Ademais, os ensaios de laboratório foram realizados tanto em amostras indeformadas coletadas na fundação, no aterro e nos resíduos do DRS2 quanto em amostras deformadas moldadas em laboratório.

## **7. DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO**

### **7.1 ENSAIOS DE LABORATÓRIO**

Para a definição dos parâmetros de resistência do estudo, foram compilados os dados das campanhas de investigação geológico-geotécnicas realizadas a partir do ano de

**AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS2**

2011, de onde foram sintetizados dados de caracterização completa, incluindo granulometria, teor de umidade, Limites de Atterberg e massa específica, além de ensaios de adensamento, compactação, permeabilidade e cisalhamento direto.

As campanhas realizadas para a estrutura DRS2, bem como a quantidade de amostras ensaiadas, são detalhadas nos subitens a seguir.

#### 7.1.1 Campanha WS GEOTECNICA (2011)

Conforme indicado no Relatório de Consolidação de dados, elaborado pela PIMENTA DE AVILA em 15/09/2015, Doc. RT-3541-54-G-095 R03, os ensaios de laboratório realizados pela WS GEOTECNIA Ltda, em 2011, foram realizados em amostras coletadas na área do Depósito DRS2 durante as investigações geológico-geotécnicas realizadas em 2011.

Nesta campanha foram coletadas duas amostras deformadas em cada furo de sondagem a trado, totalizando 22 amostras (DRS2/ST-01 a DRS2/ST-11) e foram coletadas duas amostras indeformadas em três poço de investigação, totalizando 06 amostras.

A Tabela 7.1 e a Tabela 7.2 apresentam a locação das sondagens a trado e dos poços de investigação realizados na área do DRS2 e a Tabela 7.3 apresenta a relação de ensaios realizados em cada amostra coletada.

**Tabela 7.1 – Locação das sondagens a trado realizadas no DRS2 (PIMENTA DE AVILA, 2015)**

TRADO	COORDENADAS (m)		PROF. (m)
	NORTE	ESTE	
DRS2/ST-01	9.828.199,693	757.085,951	5,10
DRS2/ST-02	9.827.869,950	755.670,600	2,40
DRS2/ST-03	9.827.813,500	756.046,491	6,20
DRS2/ST-04	9.828.357,757	756.309,112	9,30
DRS2/ST-05	9.827.938,751	756.517,251	3,60
DRS2/ST-06	9.828.771,761	756.106,073	4,60

		<b>AUDITORIA DE SEGURANÇA</b>
<b>AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS2</b>		

DRS2/ST-07	9.828.196,886	755.492,770	2,00
DRS2/ST-08	9.828.776,378	755.454,681	3,00
DRS2/ST-09	9.828.466,033	755.781,036	3,00
DRS2/ST-10	9.828.571,890	755.258,270	3,00
DRS2/ST-11	9.828.167,977	755.210,312	3,30

**Tabela 7.2 – Locação dos poços de investigação realizados no DRS2 (PIMENTA DE AVILA, 2015)**

POÇOS DE INSPEÇÃO	COORDENADAS (m)		PROF. (m)
	NORTE	ESTE	
DRS2/PI-01	9.828.846,946	756.143,249	3,00
DRS2/PI-02	9.827.871,892	756.032,472	3,00
DRS2/PI-03	9.828.245,942	755.528,448	3,00

**Tabela 7.3 – Quantidade de ensaios realizados (PIMENTA DE AVILA, 2015)**

ITEM	ENSAIO	AMOSTRAS DEFORMADAS (AD)	AMOSTRAS INDEFORMADAS (AI)	TOTAL (AD)	TOTAL (AI)
1	Teor de Umidade Natural	(DRS2/ST-01 a DRS2/ST-11)	(PI-01 a PI-03)	22	6
2	Peso Específico dos Grãos (Gs)	(DRS2/ST-01 a DRS2/ST-11)	(PI-01 a PI-03)	22	6
3	Peso Específico Natural ( $\gamma_{nat}$ )	-	(PI-01 a PI-03)	-	6
4	Granulometria Conjunta	(DRS2/ST-01 a DRS2/ST-11)	(PI-01 a PI-03)	22	6
5	Limite de Liquidez (LL)	(DRS2/ST-01 a DRS2/ST-11)	(PI-01 a PI-03)	22	6
6	Limite de Plasticidade (LP)	(DRS2/ST-01 a DRS2/ST-11)	(PI-01 a PI-03)	22	6
7	Compactação Proctor Normal com GC= 98% e Umidade Ótima (5 pontos)	(DRS2/ST-02,ST-03,ST-04,ST-06,ST-09,ST-10)	-	6	-
8	Adensamento Unidimensional	-	(PI-01 a PI-03)	-	6
9	Triaxial CIU <sub>SAT</sub>	(DRS2/ST-02,ST-03,ST-04,ST-06,ST-09,ST-10)	-	6	-
10	Triaxial CIU <sub>SAT</sub>	-	(PI-01 a PI-03)	-	6



		<b>AUDITORIA DE SEGURANÇA</b>
<b>AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS2</b>		

### 7.1.2 Campanha LOCTEST (2014)

De acordo com o Relatório de Consolidação de dados, elaborado pela PIMENTA DE AVILA em 15/09/2015, Doc. RT-3541-54-G-095 R03, a Pimenta de Ávila solicitou à HYDRO, ALUNORTE a coleta de novas amostras para realização de ensaios triaxiais devido às dificuldades de verificação da interpretação dos resultados apresentados pela WS – GEOTECNIA. Sendo assim, foram coletadas duas amostras indeformadas em outubro de 2014, nas coordenadas apresentadas na Tabela 7.4.

**Tabela 7.4 – Coordenadas dos poços de inspeção de coleta dos blocos (PIMENTA DE AVILA, 2015)**

POÇOS DE INSPEÇÃO	COORDENADAS (m)		EL. DE FUNDO (m)
	NORTE	ESTE	
DRS2/SP-05	9.828.850,95	756.133,14	14,30
DRS2/SP-10	9.828.474,15	756.094,18	12,09

Os ensaios de laboratório realizados pela LOCTEST em 2014 consistiram em ensaios de caracterização (determinação do teor de umidade, peso específico dos grãos, granulometria completa, limites de consistência), ensaios de compactação na energia Proctor Normal e ensaios Triaxiais  $CIU_{SAT}$ . Além das amostras indeformadas (SP-05 e SP-10), foi realizado o ensaio triaxial em uma amostra deformada e compactada com  $GC=100\%$  e  $w_{ót}=11,20\%$ , para determinação dos parâmetros de resistência do material do aterro.

### 7.1.3 Campanha GEOMECÂNICA (2015)

No ano de 2015, a GEOMECÂNICA realizou uma campanha de ensaios geotécnicos de laboratório extensa na área do Depósito DRS2, englobando amostras de resíduo coletadas na saída do filtro tambor ensaiadas na umidade do resíduo do filtro prensa, amostras de resíduo da área de teste do DRS2 e amostras coletadas na fundação do depósito em diversas posições e profundidades.

## AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS2

Os ensaios de laboratório realizados nas amostras de resíduo coletadas na saída do filtro tambor foram realizados antes da instalação do filtro prensa e tiveram como objetivo obter as características do resíduo filtro prensa e seus parâmetros geotécnicos, simulando diferentes condições de grau compactação e umidade esperadas de se obter em campo na compactação do resíduo do filtro prensa do DRS2.

Conforme indicado no relatório RT-3541-54-G-292-R01, emitido pela PIMENTA DE AVILA em 09/03/2016, a HYDRO, ALUNORTE informou que o resíduo que o filtro prensa receberia em condições normais e dentro das variações naturais do processo uma mistura de 27,7% MRN e 72,3% MPSA, que é similar a condição na data da amostragem. Portanto, foi estabelecido que as porcentagens da mistura das amostras para a realização dos ensaios de laboratório seriam: 100% MPSA; 34% MPSA + 66% MRN; e 72,3% MPSA + 27,7% MRN.

Os ensaios de laboratório de Caracterização Completa do Resíduo foram realizados nas três porcentagens de mistura das amostras citadas no parágrafo anterior, compreendendo os seguintes ensaios: umidade natural, Densidade Real dos Grãos, Granulometria completa com e sem uso de defloculante, Limites de consistência e Compactação Proctor Normal.

Além destes ensaios, foram realizados na porcentagem de mistura de 72,3% MPSA + 27,7% MRN, ensaios adicionais variando o teor de umidade e o grau de compactação, conforme Tabela 7.5. Os seguintes ensaios realizados nesta mistura são: Adensamento Oedométrico, permeabilidade de carga variável, Triaxial CIU saturado, Triaxial CIU não saturado, Triaxial UU saturado, Triaxial UU não saturado, Triaxial CID saturado, Cisalhamento Direto, Triaxial PN e DSS (Direct Simple Shear) Estático.

**Tabela 7.5 – Ensaios realizados na campanha Geomecânica 2015**

## AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS2

AMOSTRA A SER ENSAIADA	CONDIÇÃO DE MOLDAGEM	
	W	GC
72,3% MPSA + 27,7% MRN	$w_{ót}$	90%
	$w_{ót} + 2\%$	90%
	$w_{ót} + 4\%$	90%
	$w_{ót} + 6\%$	90%
	$w_{ót} - 2\%$	95%
	$w_{ót}$	95%
	$w_{ót} + 2\%$	95%
	$w_{ót} + 4\%$	95%

Conforme indicado no relatório RT-3541-54-G-293-R01, emitido pela PIMENTA DE ÁVILA em 09/03/2016, a PIMENTA DE ÁVILA propôs à HYDRO, ALUNORTE a construção de pistas experimentais. Os Ensaios de Laboratório foram realizados na Pista Teste construídas com as dimensões de 15m x 5,0m e 3 camadas com espessura solta de 30 cm. Em função da indisponibilidade de resíduo de filtro prensa, os testes foram realizados com o resíduo de filtro tambor, buscando-se simular as condições de umidade esperadas para a disposição do resíduo de filtro prensa no DRS2.

Os testes foram divididos em 8 cenários e a principal diferença entre os cenários é a variação do teor de umidade e condição de compactação (trator de esteira D6K e D8T ou rolo compactador pé de carneiro vibratório). Os 8 cenários são listados a seguir:

- Cenário 1:  $w_{ót} + 6\%$ , com trator de esteiras D6K;
- Cenário 2:  $w_{ót} + 4\%$ , com trator de esteiras D6K;
- Cenário 3:  $w_{ót} + 2\%$ , com trator de esteiras D6K;
- Cenário 4:  $w_{ót} + 2\%$ , com rolo compactador pé de carneiro vibratório;
- Cenário 5:  $w_{ót}$  com trator de esteiras D6K;
- Cenário 6:  $w_{ót}$  com rolo compactador pé de carneiro vibratório;
- Cenário 7:  $w_{ót} - 2\%$ , com trator de esteiras D6K;
- Cenário 8:  $w_{ót} - 2\%$ , com rolo compactador pé de carneiro vibratório.

**AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS2**

Para cada pista construída, foram coletas duas amostras indeformadas (blocos) e uma amostras deformadas com aproximadamente 50 kg para a realização de ensaios de laboratório.

A campanha de ensaios de laboratório compreendeu os seguintes ensaios: umidade natural, Densidade Real dos Grãos, Granulometria completa com e sem uso de defloculante, Limites de consistência, Compactação Proctor Normal, Adensamento Oedométrico, permeabilidade a carga variável, Triaxial CIU saturado, Triaxial CIU não saturado, Triaxial UU saturado, Triaxial UU não saturado e Triaxial PN.

#### 7.1.4 Campanha GEOMECÂNICA (2016)

O Relatório RT-5186-54-G-002, emitido pela GEOMECÂNICA em 29/01/2016, indica que foram realizadas 15 sondagens mistas na área do Depósito DRS2 para a coleta de amostras indeformadas do material da fundação e determinação das características e parâmetros de resistência do material. A locação das sondagens mistas é indicada na Tabela 7.6.

**Tabela 7.6 – Quadro de locação dos furos de sondagem mista (GEOMECÂNICA, 2016)**

FURO	COORDENADAS PROGRAMADAS		
	N	E	Cota
<b>FUROS DE SONDAAGEM MISTA</b>			
SM-01	9.828.547,5268	755.376,4054	14,892
SM-02	9.828.284,7951	755.937,6093	16,317
SM-03	9.828.168,5179	756.392,3519	14,880
SM-04	9.828.287,6723	755.589,4154	13,524
SM-05	9.828.578,5892	755.997,8363	15,767
SM-06	9.828.637,7128	755.107,6540	15,364
SM-07	9.828.823,3149	756.212,8527	14,122
SM-08	9.828.046,9838	755.952,9006	17,372
SM-09	9.828.466,1691	756.369,4227	16,738
SM-10	9.828.739,2630	755.533,4230	13,303
SM-11	9.828.776,1790	755.956,0250	14,261
SM-12	9.828.725,6740	756.148,1850	14,902
SM-13	9.828.458,1440	755.867,4300	15,716
SM-14	9.828.215,5330	755.851,7750	16,797
SM-15	9.828.210,3790	756.037,3640	16,311

## AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS2

Nesta campanha foram executados os seguintes ensaios de laboratório:

- 76 Determinações de umidade natural;
- 76 Determinações de Peso Específico Aparente;
- 76 Determinações de Densidade Real dos Grãos;
- 76 Ensaios de Granulometria por peneiramento e sedimentação;
- 68 Determinações de Limites de consistência;
- 16 Ensaios de Adensamento Oedométrico com medida de expansão;
- 05 Envoltórias para o ensaio Triaxial CIU saturado (4 cp's);
- 05 Envoltórias para o ensaio Triaxial CIU saturado (3 cp's);
- 03 Envoltórias para o ensaio Triaxial CID saturado (4 cp's);
- 33 Ensaios DSS (*Direct Simple Shear*) Estático.

O Relatório RT-5186-54-G-007, emitido pela GEOMECÂNICA em 29/01/2016, indica que foram realizadas sondagens mistas adicionais para a coleta de amostras indeformadas do material da fundação para determinação das características e parâmetros de resistência do material. A locação das sondagens mistas é indicada na Tabela 7.7.

Tabela 7.7 – Quadro de locação dos furos de sondagem mista (GEOMECÂNICA, 2016)

SONDAGENS	COORDENADAS (m)		COTA (m)	PROFUNDIDADE FINAL (m)
	NORTE	ESTE		
SM-01	9.828.876,91	755.783,32	12,663	80,2
SM-02	9.828.488,77	755.733,26	14,849	80,45
SM-03	9.828.224,65	755.353,92	12,967	80,19
SM-04	9.828.309,88	756.042,65	16,724	80,31

Nesta campanha adicional foram executados os seguintes ensaios de laboratório:

- 10 Envoltórias para o ensaio Triaxial CIU saturado (4 cp's);
- 01 Envoltórias para o ensaio Triaxial CIU saturado (3 cp's).

O Relatório RT-5186-54-G-005, emitido pela GEOMECÂNICA em 23/06/2016, indica que foram coletados 4 blocos indeformados (Bloco 01 a Bloco 04) no terreno superficial do Depósito DRS2, denominado fundação “fofa”, para caracterização e determinação dos

		<b>AUDITORIA DE SEGURANÇA</b>
<b>AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS2</b>		

parâmetros de resistência da Fundação do Depósito DRS2. Nesta campanha foram executados seguintes ensaios de laboratório:

- 08 Determinações de umidade natural;
- 08 Determinações de Densidade Real dos Grãos;
- 08 Ensaios de Granulometria completa com uso de defloculante;
- 08 Determinações de Limites de consistência;
- 04 Ensaios de Adensamento Oedométrico com medida de expansão e permeabilidade;
- 04 Ensaios de Permeabilidade com Carga Variável;
- 04 Ensaios de Cisalhamento Direto com 16 CP's;
- 04 Ensaios de Cisalhamento Direto da interface Solo de Fundação – Geomembrana com 16 CP's;
- 04 Ensaio Triaxial CIU saturados com 16 CP's;
- 12 Ensaios DSS (*Direct Simple Shear*) Estático com 12 CP's.

## **7.2 PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA ADOTADOS NO RISR DO 2º CICLO/2021**

O estudo mais recente realizado na estrutura e disponibilizado para a FONNTES foi o Relatório da Inspeção de Segurança Regular do DRS2, elaborado pela GEOCONSULTORIA em fevereiro de 2022, documento RT-469137-54-G-0002\_rev03. Neste documento, a empresa apresentou as análises de estabilidade considerando a condição de operação do depósito no segundo semestre de 2021 e os registros freáticos e piezométricos obtidos neste período. Os parâmetros de resistência foram definidos com base no item 4 do Relatório de Memória de Cálculo das Análises Geotécnicas, elaborado pela PIMENTA DE ÁVILA em 26/02/2018, doc. DB-3541-54-G-319-rev01.

A Tabela 7.8 apresenta os parâmetros de resistência adotados nas análises de estabilidade pela Pimenta de Ávila, 2016, no Documento DB-3541-54-G-319-rev01, Projeto Detalhado. A Tabela 7.9 apresenta os parâmetros de resistência adotados nas

		<b>AUDITORIA DE SEGURANÇA</b>
<b>AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS2</b>		

análises de estabilidade pela GEOCONSULTORIA, 2022, no Documento RT-469137-54-G-0002\_rev03, Relatório da Inspeção de Segurança Regular do DRS2.

Ao comparar os parâmetros de resistência adotados nas análises de estabilidade realizadas pela GEOCONSULTORIA, 2022, no RT-469137-54-G-0002\_rev03, Relatório da Inspeção de Segurança Regular do DRS2, (Tabela 7.9) e os parâmetros de resistência adotados pela Pimenta de Ávila (Tabela 7.8), verifica-se que são similares.

**Tabela 7.8 – Parâmetros de Resistência adotados nas análises de estabilidade pela Pimenta de Ávila, 2016, no Documento DB-3541-54-G-319, Projeto Detalhado.**

Material	Peso Específico (kN/m <sup>3</sup> )	Parâmetros			Fonte dos dados
		Efetivos - Mohr Coulomb		Não Drenado	
		Coesão c' (kPa)	Ângulo de atrito Φ' (°)	Su/σ'	
Fundação fofa	17,0	8,0	21,0	0,300	Triaxial CU : LOCTEST – 2014 e Triaxial CU: RT-5186-54-G-005/ RJ-5669-07 (Geomecânica) (ANEXO B)
Fundação densa	20,0	13,0	27,0	0,500	RT-5186-54-G-002/RJ-5669-02 e RT-5186-54-G-007/RJ-5669-07 (Geomecânica) (ANEXO C)
Resíduo seco	18,5	6,0	33,0	0,520	Relatório RT-5186-54-G-001/ RJ-5640-019 (Geomecânica) (ANEXO A)
Resíduo úmido	17,5	2,0	32,0	0,362	Relatório RT-5186-54-G-001/ RJ-5640-019 (Geomecânica) (ANEXO A)
Aterro	20,9	9,0	31,0	-	Triaxial CU sat - LOCTEST – 2014 (ANEXO D)
Drenos e filtros	19,0	0,0	32,0	-	Estimado
Interface rugosa Geomembrana	19,0	0,0	27,5	-	RT-5186-54-G-005/RJ-5669-07 (Geomecânica)
Interface lisa Geomembrana	19,0	0,0	17,0	-	RT-5186-54-G-003/ RJ-5669-04 (Geomecânica)

**Tabela 7.9 – Parâmetros de Resistência adotados nas análises de estabilidade pela GEOCONSULTORIA, 2022, no Documento RT-469137-54-G-0002, Relatório da Inspeção de Segurança Regular do DRS2.**

**AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS2**

Material	Peso Específico (kN/m <sup>3</sup> )	Parâmetros			Fonte dos dados
		Efetivos - Mohr Coulomb		Não Drenado	
		Coesão c' (kPa)	Ângulo de atrito Φ' (°)	Su/σ'	
Fundação fofa	17,0	8,0	21,0	0,300	Pimenta de Ávila (2016)
Fundação densa	20,0	13,0	27,0	0,500	Pimenta de Ávila (2016)
Resíduo seco	18,5	6,0	33,0	0,520	Pimenta de Ávila (2016)
Resíduo úmido	17,5	2,0	32,0	0,362	Pimenta de Ávila (2016)
Aterro	20,9	9,0	31,0	-	Pimenta de Ávila (2016)
Drenos e filtros	19,0	0,0	32,0	-	Pimenta de Ávila (2016)
Interface rugosa Geomembrana	19,0	0,0	27,5	-	Pimenta de Ávila (2016)
Interface lisa Geomembrana	19,0	0,0	17,0	-	Pimenta de Ávila (2016)

### 7.3 AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA DOS PARÂMETROS

Neste item, é realizado um compilado dos resultados dos ensaios de compressão triaxial realizados para o Depósito DRS2. Destaca-se que para avaliação dos parâmetros de resistência drenados dos materiais foram avaliados os ensaios de compressão triaxial do tipo adensado isotropicamente e não-drenado (*Consolidated Isotropic Undrained - CIU*) e do tipo adensado isotropicamente e drenado (*Consolidated Isotropic Drained - CID*).

#### 7.3.1 Fundação Fofa

Para a avaliação dos parâmetros de resistência da fundação fofa, foram analisados os ensaios triaxiais tipo CIU<sub>SAT</sub> das campanhas de investigação realizadas pela LOCTEST em 2014 e GEOMECÂNICA (2015), executados na profundidade máxima de 3,0 m.



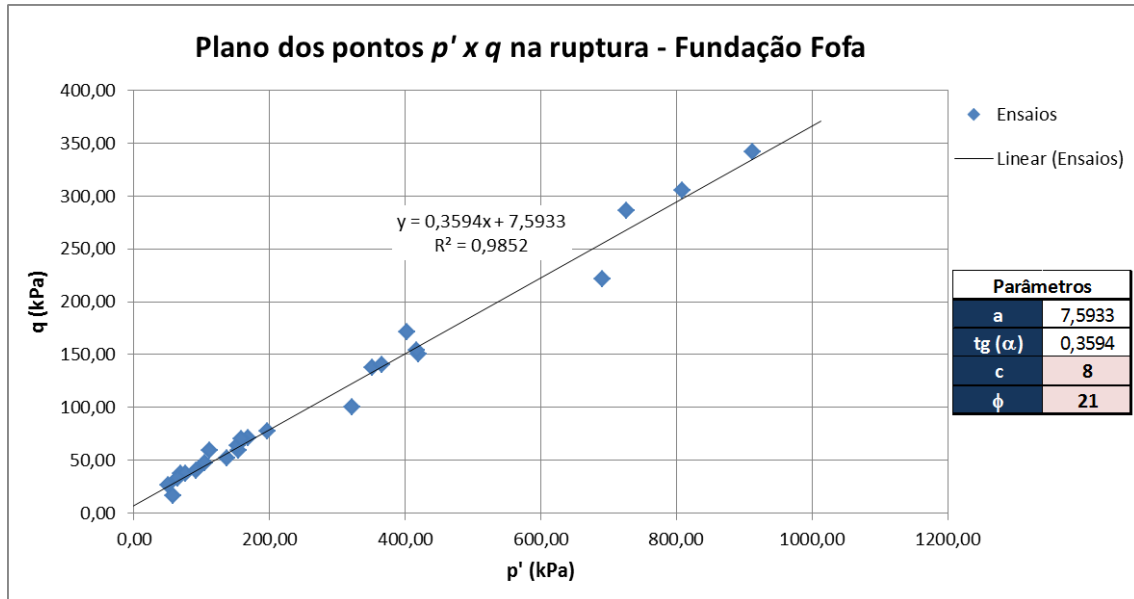
		<b>AUDITORIA DE SEGURANÇA</b>
<b>AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS2</b>		

Destaca-se que foi disponibilizada à FONNTES a interpretação individual dos ensaios executados pela GEOMECÂNICA em 2015 com resultados dos ensaios CIU<sub>SAT</sub> obtidos para envoltória de ruptura resultante da máxima tensão desviadora. Portanto, a Tabela 7.10 apresenta os parâmetros de resistência das amostras de fundação fofa obtidos nos ensaios na máxima tensão desviadora. Os ensaios executados pela LOCTEST em 2014 foram interpretados pela PIMENTA DE AVILA, no doc. DB-3541-54-G-319, e os ensaios executados pela GEOMECÂNICA em 2015 foram interpretados pela FONNTES, no presente documento.

**Tabela 7.10 – Avaliação Estatística dos Ensaios Triaxiais da Fundação Fofa do DRS2.**

MATERIAL	CAMPANHA	AMOSTRA	PESO ESP. $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	COESÃO c (kPa)	ÂNGULO DE ATRITO $\phi$ (°)
FUNDAÇÃO FOFA	LOCTEST (2014)	SP-05	17,19	0,0	33,7
		SP-10	17,55	0,0	36,9
	GEOMECÂNICA (2015)	BLOCO 01	17,30	20,0	14,4
		BLOCO 02	18,90	0,0	25,3
		BLOCO 03	17,30	20,7	26,4
		BLOCO 04	18,60	21,5	21,0
<b>MÉDIA</b>	-	-	<b>18,03</b>	<b>10,37</b>	<b>26,28</b>
<b>DESV. PAD.</b>	-	-	<b>0,733</b>	<b>10,38</b>	<b>7,50</b>

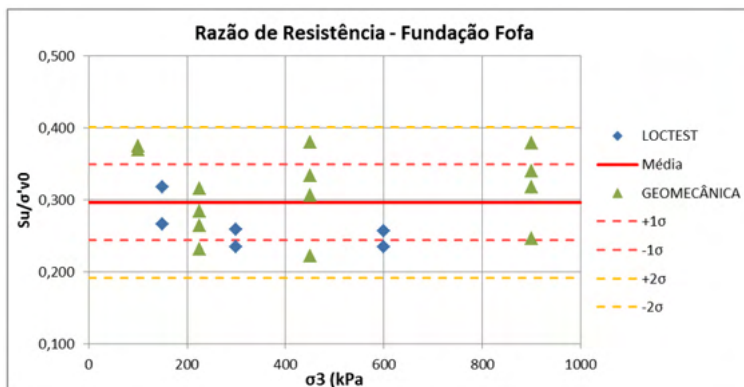
Para a definição dos parâmetros de resistência, a PIMENTA DE AVILA realizou a análises conjunta dos ensaios triaxiais CIU executados na Fundação Fofa, traçando-se uma envoltória de ruptura média em um único gráfico  $p' \times q$ , indicado na Figura 7.1.

**AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS2**


**Figura 7.1 – Parâmetros de resistência efetivos da fundação fofa –Ensaio triaxiais CU<sub>sat</sub> – Critério da máxima tensão desviadora (PIMENTA DE AVILA, 2018).**

Observa-se que os parâmetros de resistência da fundação foram adotados pela PIMENTA DE AVILA (2018) foram mais conservadores do que a média dos parâmetros de resistência obtidos na Tabela 7.10 ( $c'=10$  kPa e  $\phi'=26^\circ$ ).

O doc. DB-3541-54-G-319 R01, da PIMENTA DE AVILA (2018), também define parâmetros de resistência não drenados para o material da Fundação Fofa, a serem utilizados nas análises de estabilidade na condição não drenada. Desta forma, conforme indicado na Figura 7.2, a PIMENTA DE AVILA utilizou os Ensaio Triaxiais CIU<sub>SAT</sub> e obteve um parâmetro de resistência não drenada médio ( $S_u/\sigma'_v$ ) igual a 0,30, com desvio padrão de 0,05.

**AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS2**


Razão de Resistência	
<b>0,300</b>	Média
<b>0,05</b>	Desvio padrão
<b>18%</b>	CV

**Figura 7.2 – Razão de resistência da fundação fofa obtida a partir dos Ensaios CU<sub>SAT</sub> do Relatório 5186-54-G-005 (GEOMECÂNICA) e Boletins de ensaios da LOCTEST (2014) (PIMENTA DE AVILA, 2018)**

### 7.3.2 Fundação Densa

Para a avaliação dos parâmetros de resistência da fundação densa, foram analisados os ensaios triaxiais tipo CIU<sub>SAT</sub> das campanhas de investigação realizadas GEOMECÂNICA em 2015, executados entre as profundidades 3,0 m e 40,0 m.

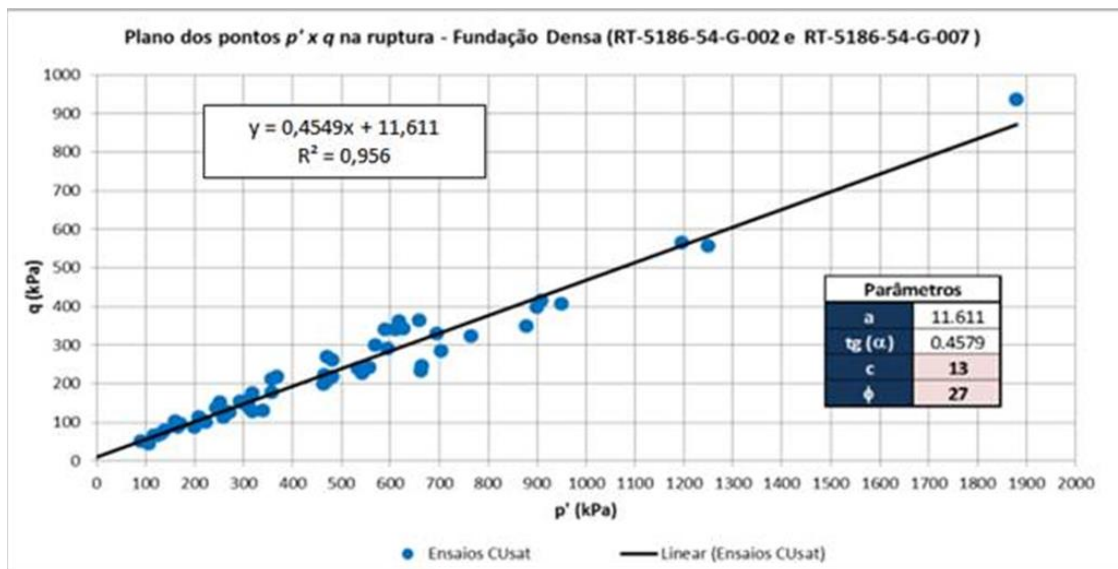
Destaca-se que a interpretação dos ensaios executados pela GEOMECÂNICA em 2015 pela projetista foi realizada com os resultados dos ensaios CIU<sub>SAT</sub> obtidos na máxima tensão desviadora. Portanto, a Tabela 7.11 apresenta os parâmetros de resistência das amostras de fundação densa obtidos nos ensaios na máxima tensão desviadora. Os ensaios executados pela GEOMECÂNICA em 2015 foram interpretados pela FONNTES, no presente documento.

**Tabela 7.11 – Avaliação Estatística dos Ensaios Triaxiais da Fundação Densa do DRS2.**

**AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS2**

CAMPANHA	AMOSTRA	PROF. (m)	PESO ESP. $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	COESÃO C (kPa)	ÂNGULO DE ATRITO $\phi$ (°)
GEOMECÂNICA (2015)	SM-02	19,70 - 19,80 m	20,86	90,2	21,5
	SM-02	26,00 - 26,10 m	20,70	4,1	35,0
	SM-03	19,15 a 19,25	19,93	20,5	25,5
	SM-04	19,85 - 19,92 m	20,54	100,8	22,0
	SM-04	39,62 a 39,72 m	20,56	12,9	32,4
	SM-05	24,85 - 24,95 m	19,61	8,9	30,5
	SM-07	19,02 - 19,12 m	20,53	41,0	21,2
	SM-08	19,10 - 19,20 m	21,15	42,1	23,6
	SM-09	19,70 - 19,80 m	87,28	37,8	23,1
	SM-15	39,10 - 39,20 m	17,42	18,8	22,8
	SM-01	13,13 - 13,23 m	20,50	0,0	28,0
	SM-01	36,30 - 36,40 m	15,88	27,8	18,2
	SM-02	18,33 - 18,43m	20,60	30,5	22,9
	SM-03	24,05 - 24,15 m	19,09	17,3	22,8
	SM-04	9,20 - 9,29 m	20,47	59,7	28,2
<b>MÉDIA</b>	-		<b>24,34</b>	<b>34,16</b>	<b>25,18</b>
<b>DESV. PAD.</b>	-		<b>16,88</b>	<b>28,61</b>	<b>4,51</b>

Para a definição dos parâmetros de resistência, a PIMENTA DE AVILA realizou a análise conjunta dos ensaios triaxiais CIU executados na fundação densa, traçando-se um único gráfico  $p' \times q$ , indicado na Figura 7.3.

**AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS2**


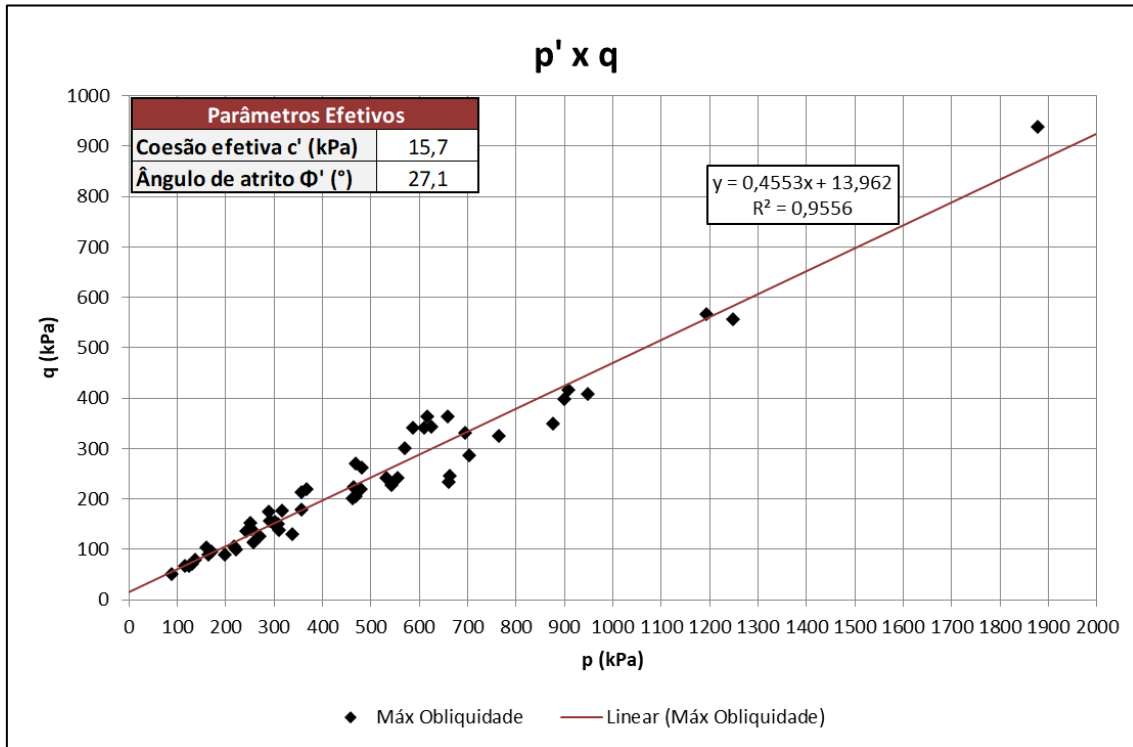
**Figura 7.3 – Parâmetros de resistência efetivos da fundação densa – Amostras extraídas até a profundidade 40 m – Ensaios triaxiais CUsat – Critério da máxima obliquidade (PIMENTA DE AVILA, 2018).**

Observa-se que houve uma diferença significativa entre os valores do intercepto coesivo da fundação densa obtidos pela PIMENTA DE AVILA em 2018 ( $c' = 13$  kPa e  $\phi' = 27^\circ$ ) e na Tabela 7.10 pela FONNTES ( $c' = 34$  kPa e  $\phi' = 25^\circ$ ). Tal diferença é devido a forma de se avaliar os ensaios. Em atendimento ao que é perguntado na letra 'H' da TAC 3.1, a FONNTES realizou a avaliação através da média dos resultados, enquanto a PIMENTA DE AVILA (projetista) verificou os pontos de máxima obliquidade das trajetórias de ruptura para cada corpo de prova dos ensaios triaxiais CIU. A avaliação realizada pela projetista geralmente é mais representativa e muito utilizada no mercado quando se possui um bom banco de dados de ensaios.

De modo a validar a análise da PIMENTA DE AVILA (2018), a FONNTES realizou a interpretação conjunta dos ensaios triaxiais executados pela GEOMECÂNICA (2015) seguindo a mesma diretriz realizada pelo projetista. Como se pode observar na Figura 7.4, a análise da FONNTES forneceu resultados próximos aos encontrados pela PIMENTA DE AVILA. A interpretação da FONNTES resultou em um intercepto coesivo superior ao

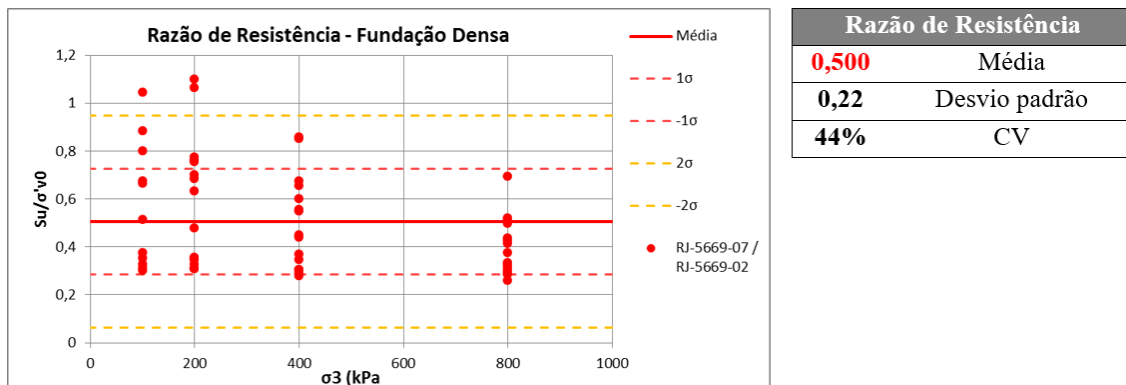
**AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS2**

obtido pela PIMENTA DE AVILA, em 3 kPa, indicando que os parâmetros adotados pela PIMENTA DE AVILA foram mais conservadores.



**Figura 7.4 – Determinação dos parâmetros de resistência efetivos da Fundação Densa do DRS2, a partir da avaliação conjunta dos ensaios triaxiais CIUSat executados pela GEOMECÂNICA**

O doc. DB-3541-54-G-319 R01, da PIMENTA DE AVILA (2018), também define parâmetros de resistência não drenados para o material da Fundação Densa, a serem utilizados nas análises de estabilidade na condição não drenada. Desta forma, conforme indicado na Figura 7.5, a PIMENTA DE AVILA utilizou os Ensaio Triaxiais CIUSAT e obteve um parâmetro de resistência não drenada médio ( $S_u/\sigma'_v$ ) igual a 0,50, com desvio padrão de 0,22.

**AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS2**


**Figura 7.5 – Razão de resistência da fundação densa obtida a partir dos Ensaios CU<sub>SAT</sub> do Relatórios RT-5186-54-G-007 e 5186-54-G-002 da GEOMECÂNICA (PIMENTA DE AVILA, 2015)**

### 7.3.3 Resíduo da Zona estrutural

Para a avaliação dos parâmetros de resistência efetivos do resíduo da zona estrutural, foram analisados os ensaios triaxiais tipo CIU<sub>SAT</sub> e CID<sub>SAT</sub> das campanhas de investigação realizadas pela GEOMECÂNICA em 2015, executados em amostras do Filtro Tambor compactados a um grau de compactação de 95% do Proctor Normal. Os ensaios foram realizados em corpos de prova saturados, aplicando-se tensões confinantes de 50, 150, 300 e 600 kPa.

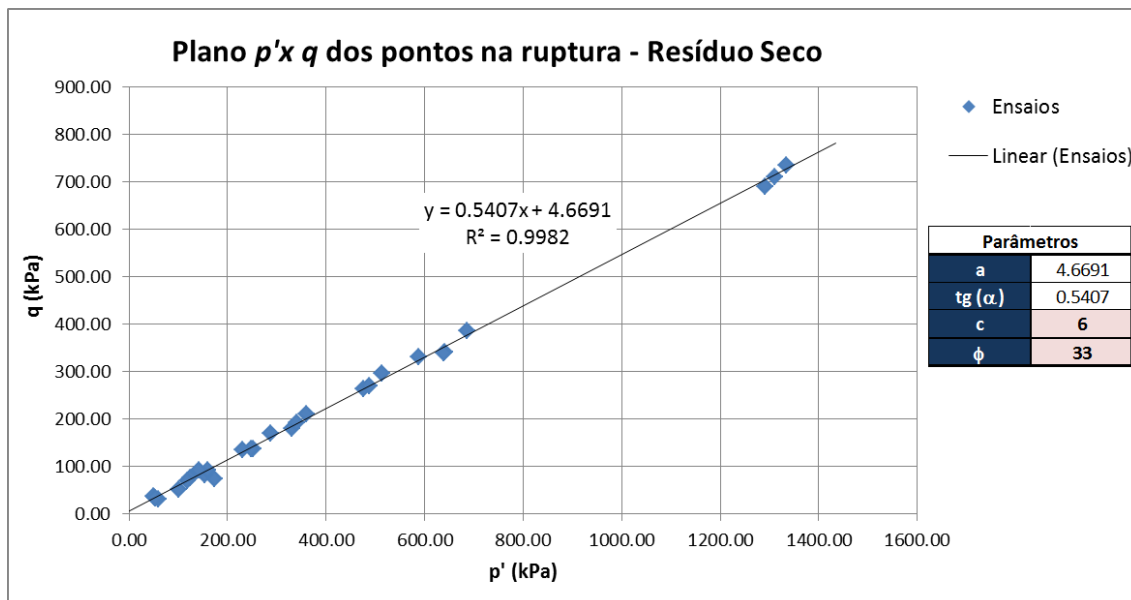
A interpretação dos ensaios triaxiais CIU<sub>SAT</sub> e CID<sub>SAT</sub> foi realizada pela PIMENTA DE AVILA em março de 2016, no doc. RT-3541-54-G-292, e se encontra resumida na Tabela 7.12. Além dos parâmetros de resistência efetivos obtidos nos ensaios triaxiais de cada amostra, apresenta-se também a média e o desvio padrão.

**Tabela 7.12 – Avaliação Estatística dos Ensaios Triaxiais do Resíduo da Zona estrutural do DRS2.**

**AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS2**

CAMPANHA	AMOSTRA	ENSAIO	PESO ESP. $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	COESÃO C (kPa)	ÂNGULO DE ATRITO $\phi$ (°)
GEOMECÂNICA (2015)	wot + 4% com GC= 95%	CIUsat	18,9	4,9	32,5
	wot + 2% com GC= 95%	CIUsat	18,6	0	31,8
	wot; GC=95%	CIUsat	18,2	0	34,9
	wot – 2% com GC= 95%	CIUsat	17,5	5,4	32,6
	wót + 4% com GC=95%	CID	18,9	14,8	32,3
	wót + 2% com GC=95%	CID	18,6	0	32,6
	wót com GC=95%	CID	18,2	20,2	30,5
<b>MÉDIA</b>	-	-	<b>18,41</b>	<b>6,47</b>	<b>32,46</b>
<b>DESV. PAD.</b>	-	-	<b>0,458</b>	<b>7,44</b>	<b>1,21</b>

Para a definição dos parâmetros de resistência, a PIMENTA DE AVILA realizou a análise conjunta dos ensaios triaxiais tipo CIUSAT e CIDSAT executados no Resíduo da Zona estrutural, traçando-se um único gráfico  $p' \times q$  a partir dos pontos de máxima obliquidade da trajetória de ruptura para cada corpo de prova, conforme indicado na Figura 7.6.



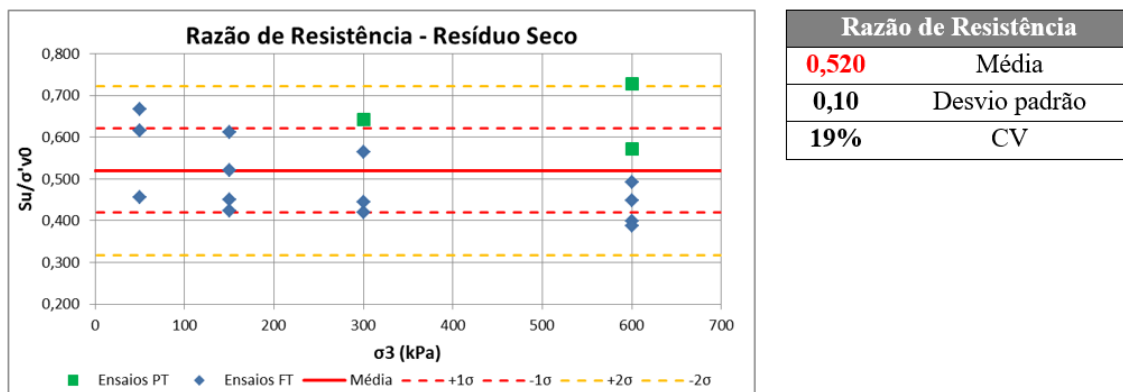
**Figura 7.6 – Parâmetros de resistência efetivos do resíduo da zona estrutural – Amostras do Filtro Tambor com GC = 95% - Ensaios CUsat e CDSat – Critério de ruptura de máxima obliquidade (PIMENTA DE AVILA, 2018).**



**AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS2**

Observa-se que os parâmetros de resistência dos resíduos da zona estrutural adotados pela PIMENTA DE AVILA (2018) foram similares à média dos parâmetros de resistência obtidos na Tabela 7.12 ( $c'=6$  kPa e  $\phi'=33^\circ$ ).

O doc. DB-3541-54-G-319 R01, da PIMENTA DE AVILA (2018), também define parâmetros de resistência não drenados para o resíduo da zona estrutural, a serem utilizados nas análises de estabilidade na condição não drenada. Desta forma, conforme indicado na Figura 7.7, a PIMENTA DE AVILA utilizou os Ensaios Triaxiais CIU<sub>SAT</sub> e obteve um parâmetro de resistência não drenada médio ( $S_u/\sigma'_v$ ) igual a 0,52, com desvio padrão de 0,10.



**Figura 7.7 – Razão de resistência do resíduo da zona estrutural das Amostras do Filtro Tambor e da Pista Teste com GC  $\approx$  95% obtida a partir dos Ensaios CU<sub>sat</sub> nos Relatórios RT-5186-54-G-001 e RT-3541-54-G-293-R01 (PIMENTA DE AVILA, 2018)**

### 7.3.4 Resíduo da Zona interna

Para a avaliação dos parâmetros de resistência efetivos do resíduo da zona interna, foram analisados os ensaios triaxiais tipo CIU<sub>SAT</sub> e CID<sub>SAT</sub> das campanhas de investigação realizadas pela GEOMECÂNICA em 2015, executados em amostras do Filtro Tambor compactados a um grau de compactação de 90% do Proctor Normal. Os ensaios foram realizados em corpos de prova saturados, aplicando-se tensões confinantes de 50, 150, 300 e 600 kPa.

**AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS2**

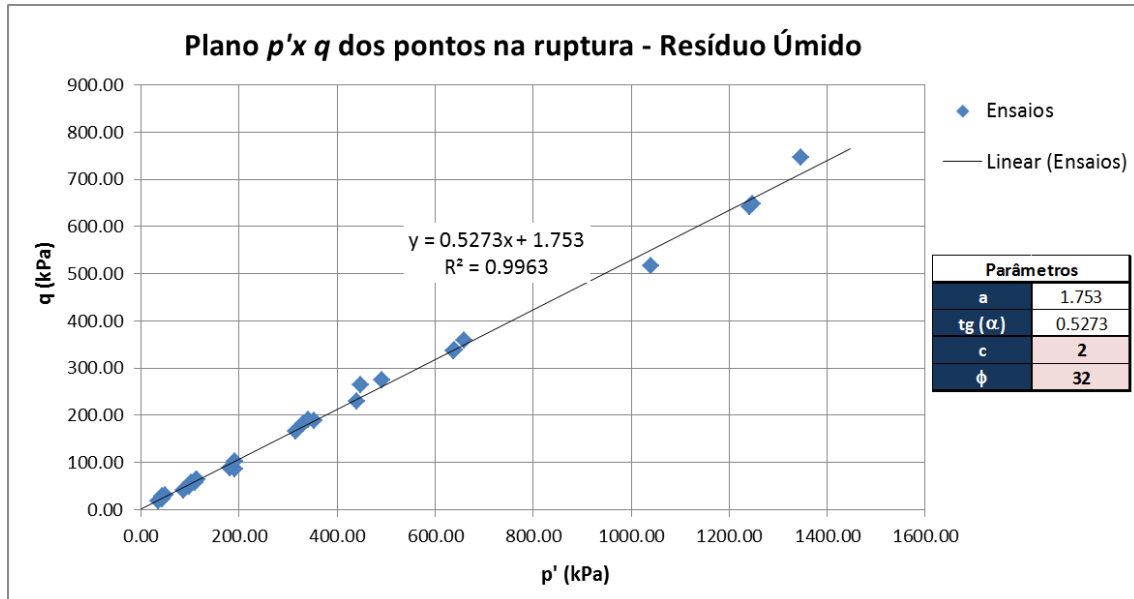
A interpretação dos ensaios triaxiais  $CIU_{SAT}$  e  $CID_{SAT}$  foi realizada pela PIMENTA DE AVILA em março de 2016, no doc. RT-3541-54-G-292, e se encontra resumida na Tabela 7.13. Além dos parâmetros de resistência efetivos obtidos nos ensaios triaxiais de cada amostra, apresenta-se também a média e o desvio padrão.

**Tabela 7.13 – Avaliação Estatística dos Ensaio Triaxiais do Resíduo da Zona interna do DRS2.**

CAMPANHA	AMOSTRA	ENSAIO	PESO ESP. $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	COESÃO C (kPa)	ÂNGULO DE ATRITO $\phi$ (°)
GEOMECÂNICA (2015)	wot + 6% com GC=90%	CIUsat	18,1	4,4	29
	wot + 4% com GC=90%	CIUsat	17,4	0	36,2
	wot + 2% com GC=90%	CIUsat	17,5	0	33,1
	wot; GC= 90%	CIUsat	17,3	0,2	29,9
	wót + 4% com GC=90%	CID	17,4	78,1 <sup>1</sup>	33,7 <sup>1</sup>
	wót + 2% com GC=90%	CID	17,5	10,6	30,8
	wót com GC=90%	CID	17,3	9,1	30,3
<b>MÉDIA</b>	-	-	<b>17,50</b>	<b>4,05</b>	<b>31,55</b>
<b>DESV. PAD.</b>	-	-	<b>0,256</b>	<b>4,40</b>	<b>2,43</b>

Nota: 1) Tendo em vista que os parâmetros de resistência do ensaio triaxial CID realizado na amostra “wót + 4% com GC=90%” forneceu resultados de coesão muito superiores aos demais ensaios, incluindo o triaxial CID realizado na amostra “wót + 4% com GC=95%”, a FONNTES considerou prudente desconsiderá-los no cálculo da média e desvio padrão.

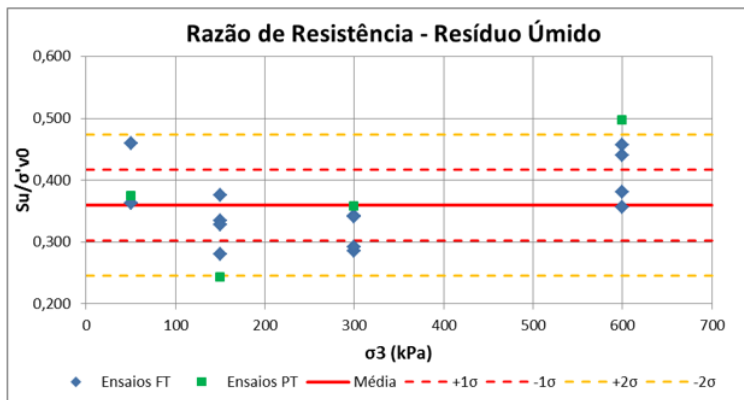
Para a definição dos parâmetros de resistência, a PIMENTA DE AVILA realizou a análise conjunta dos ensaios triaxiais tipo  $CIU_{SAT}$  e  $CID_{SAT}$  executados no Resíduo da Zona interna, traçando-se uma envoltória de ruptura média a partir dos pontos de máxima obliquidade das trajetórias de rupturas dos corpos de prova, plotados em um gráfico  $p'$  x  $q$ , conforme apresentado na Figura 7.8.

**AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS2**


**Figura 7.8 – Parâmetros de resistência efetivos do resíduo da zona interna – Amostras do Filtro Tambor com GC = 90% - Ensaio CU<sub>sat</sub> e CD<sub>sat</sub> – Critério de ruptura de máxima obliquidade (PIMENTA DE AVILA, 2018).**

Observa-se que os parâmetros de resistência do resíduo da zona interna adotados pela PIMENTA DE AVILA (2018) foram parecidos com a média dos parâmetros de resistência obtido na Tabela 7.13 ( $c'=4$  kPa e  $\phi'=32^\circ$ ), havendo apenas uma diferença de 2 kPa no intercepto coesivo.

O doc. DB-3541-54-G-319 R01, da PIMENTA DE AVILA (2018), também define parâmetros de resistência não drenados para o resíduo da zona estrutural, a serem utilizados nas análises de estabilidade na condição não drenada. Desta forma, conforme indicado na Figura 7.9, a PIMENTA DE AVILA utilizou os Ensaio Triaxiais CIU<sub>SAT</sub> e obteve um parâmetro de resistência não drenada médio ( $S_u/\sigma'_v$ ) igual a 0,362, com desvio padrão de 0,07.

**AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS2**


Razão de Resistência	
<b>0,362</b>	Média
<b>0,07</b>	Desvio padrão
<b>18%</b>	CV

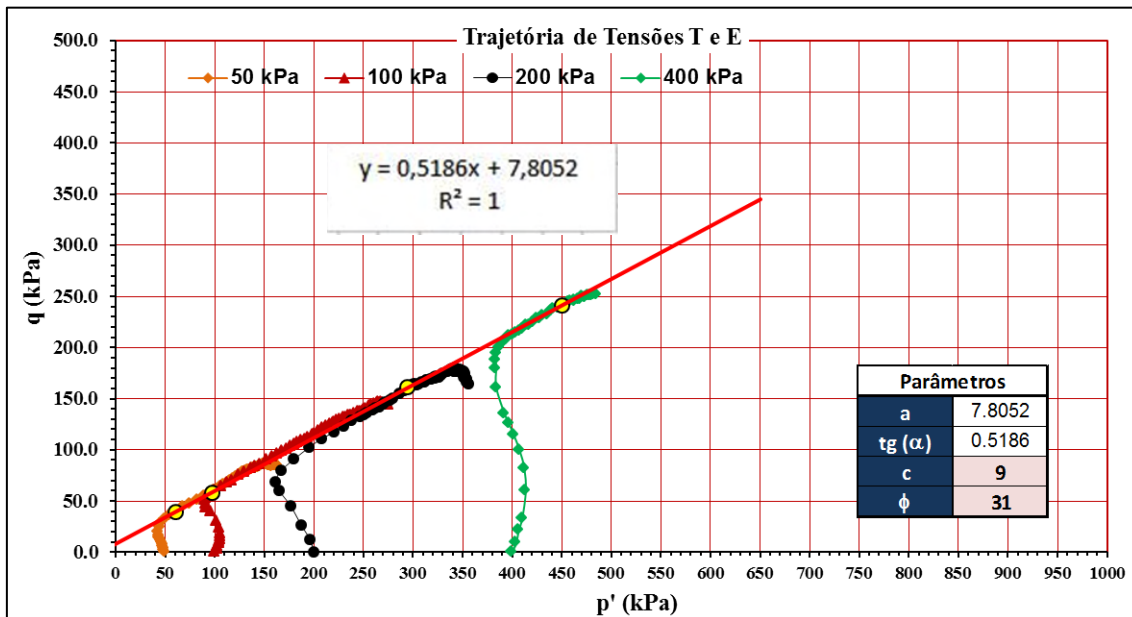
**Figura 7.9 – Razão de resistência do resíduo da zona interna das Amostras do Filtro Tambor e da Pista Teste com GC  $\approx$  95% obtida a partir dos Ensaios CU<sub>sat</sub> nos Relatórios RT-5186-54-G-001 e RT-3541-54-G-293-R01 (PIMENTA DE AVILA, 2018)**

### 7.3.5 Aterro

Para a avaliação dos parâmetros de resistência efetivos do aterro, foi analisado o ensaio triaxial tipo CIU<sub>SAT</sub> da campanha de investigação realizada pela LOCTEST em 2014, em uma amostra deformada extraída na profundidade 2 m (Furo SP-10) e compactadas com GC=100%PN.

O ensaio executado pela LOCTEST em 2014 foi interpretado pela PIMENTA DE AVILA, no doc. DB-3541-54-G-319, e se encontra na Figura 7.10. Vale ressaltar que a figura não apresenta a indicação do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), pois foi extraído diretamente do relatório da PIMENTA DE AVILA.

O resumo do ensaio é apresentado na Tabela 7.14.

**AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS2**


**Figura 7.10 – Parâmetros de resistência efetivos do aterro – Amostra deformada extraída na profundidade 2 m (Furo SP-10) – Ensaios triaxiais CU<sub>sat</sub> – Amostras compactadas com GC=100% - Critério da máxima obliquidade (PIMENTA DE AVILA, 2018).**

**Tabela 7.14 – Avaliação Estatística dos Ensaios Triaxiais do Aterro.**

CAMPANHA	AMOSTRA	PESO ESPECÍFICO	COESÃO	ATRITO
LOCTEST (2014)	SP-10 (Deform.)	20,92	9	31

Tendo em vista que foi disponibilizado apenas um ensaio triaxial em amostra da fundação compactada com GC=100%, os valores adotados pela PIMENTA DE AVILA se mostram adequados.

## 8. CONCLUSÕES

Neste relatório foi realizada a avaliação do banco de dados de ensaios de laboratório, que são a medidas diretas e mais confiáveis para a obtenção dos parâmetros de resistência efetivos dos materiais (intercepto coesivo e ângulo de atrito). Para melhor organização das informações consultadas sobre os ensaios de resistência dos materiais, foi realizada uma verificação para as principais campanhas de ensaios e os resultados

		<b>AUDITORIA DE SEGURANÇA</b>
<b>AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS2</b>		

obtidos. Comparativamente, foi verificada para cada material quais os parâmetros médios calculados e aqueles adotados em projeto pela empresa projetista.

No geral, os valores médios calculados pela FONNTES foram maiores do que aqueles adotados em projeto, o que pode indicar que o projeto foi conservador. Essa afirmação mostrou-se válida para os parâmetros de resistência efetivos de: Fundação Fofa, cujos ensaios foram executados em amostras coletadas a uma profundidade máxima de 3,0 m; Resíduos da Zona Estrutural, cujos ensaios foram executados em amostras do Filtro Tambor compactadas a um grau de compactação de 95% do Proctor Normal; e Resíduos da Zona Estrutural, cujos ensaios foram executados em amostras do Filtro Tambor compactados a um grau de compactação de 90% do Proctor Normal.

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

Devido à discrepância entre os valores do intercepto coesivo da fundação densa obtidos pela análise conjunta dos ensaios pela PIMENTA DE AVILA em 2018 ( $c' = 13$  kPa e  $\phi' = 27^\circ$ ) e pela FONNTES através da média dos resultados ( $c' = 34$  kPa e  $\phi' = 25^\circ$ ), a FONNTES realizou a interpretação conjunta dos ensaios triaxiais executados pela GEOMECÂNICA (2015), seguindo a mesma diretriz realizada pelo projetista. Com isso, a análise da FONNTES forneceu resultados próximos aos encontrados pela PIMENTA DE AVILA, obtendo-se um intercepto coesivo superior ao obtido pela PIMENTA DE AVILA, em 3 kPa. Esse resultado indicou que os parâmetros adotados pela projetista foram mais conservadores. Portanto, não foram encontradas divergências entre os parâmetros adotados e os ensaios.

**AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS2**

A partir da revisão dos parâmetros geotécnicos de coesão e ângulo de atrito efetivos realizada no presente relatório, verifica-se que os parâmetros definidos com no Relatório de Memória de Cálculo das Análises Geotécnicas, elaborado pela PIMENTA DE ÁVILA em 26/02/2018, doc. DB-3541-54-G-319-ver0, e replicados no Relatório da Inspeção de Segurança Regular do DRS2, elaborado pela GEOCONSULTORIA em fevereiro de 2022, documento RT-469137-54-G-0002\_rev03, estão coerentes. Deste modo, a FONNTES entende que a adoção de tais parâmetros de resistência nas análises de estabilidade do DRS2 é adequada e representa bem a resistência dos materiais.

## 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. 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.
- iii. 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.
- iv. IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Barcarena/PA. População. 2010. Disponível em <[IBGE | Cidades@ | Pará | Barcarena | Panorama](#)>
- v. \_\_\_\_\_. Barcarena/PA. Educação. 2010b. Disponível em <[IBGE | Cidades@ | Pará | Barcarena | Panorama](#)>
- vi. \_\_\_\_\_. Barcarena/PA. Economia. 2019. Disponível em <[IBGE | Cidades@ | Pará | Barcarena | Panorama](#)>
- vii. \_\_\_\_\_. Barcarena/PA. Trabalho e Rendimento. 2020. Disponível em <[IBGE | Cidades@ | Pará | Barcarena | Panorama](#)>

**AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS2**

- viii. \_\_\_\_\_. Barcarena/PA. Território e ambiente. 2021. Disponível em <[IBGE | Cidades@ | Pará | Barcarena | Panorama](#)>
- ix. MABESOONE, J. M. e CASTRO, C. (1975). Desenvolvimento Geomorfológico do Nordeste Brasileiro. Boletim do Núcleo Nordeste da SBG, Recife, v.3, p. 05- 35.
- x. 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.





**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