

FG-2201-NHB-A-BA-RT19-02

À

NORSK HYDRO BRASIL

Av. Gentil Bittencourt, 549

Belém – PA

A/C

CAROLINA VARKALA

Departamento de Suprimentos de Bauxita & Alumina

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

Prezada,

Apresentamos o relatório técnico de 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, 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,

Fontes
DIRETOR
FONNTES GEOTÉCNICA

RELATÓRIO TÉCNICO DE AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS1

CLIENTE:



PROJETO:

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

BARCARENA - PA



AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS1**SUMÁRIO**

GLOSSÁRIO	1
1. INTRODUÇÃO	3
2. OBJETIVO	6
3. DADOS UTILIZADOS	7
4. ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO	9
5. APRESENTAÇÃO DA ESTRUTURA.....	10
5.1 LOCALIZAÇÃO	13
5.2 ASPECTOS GEOLÓGICOS	19
5.2.1 <i>Histórico de Investigações</i>	21
5.2.2 <i>Geologia Local</i>	22
5.3 DRENAGEM INTERNA	23
5.4 SISTEMA EXTRAVASOR E DRENAGEM SUPERFICIAL	23
5.5 INSTRUMENTAÇÃO	24
5.6 FECHAMENTO DO DEPÓSITO DRS1	24
6. METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO	27
7. DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO.....	29
7.1 ENSAIOS DE LABORATÓRIO.....	29
7.1.1 <i>Campanha GEOLABOR (2003)</i>	29
7.1.2 <i>Campanha WS GEOTECNICA (2008)</i>	30
7.1.3 <i>Campanha FUGRO (2014)</i>	30
7.1.4 <i>Campanha GEOMECÂNICA (2016)</i>	31
7.1.5 <i>Campanha GEOMECÂNICA (2016)</i>	32
7.1.6 <i>Campanha GEOFORMA (2017)</i>	33
7.1.7 <i>Campanha FUGRO (2019)</i>	34
7.1.8 <i>Campanha FUGRO (2021)</i>	34
7.2 PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA ADOTADOS NO RISR DO 2º CICLO/2022	40
7.3 AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA DOS PARÂMETROS	46
7.3.1 <i>Fundação</i>	46
7.3.2 <i>Resíduo Filtro Prensa</i>	51
7.3.3 <i>Resíduo Filtro Tambor</i>	53

AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS1

7.3.4	Aterro Compactado	58
8.	CONCLUSÕES	61
9.	REFERÊNCIAS	62

AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS 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
- MPPA – Ministério Público do Estado do Pará

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS1		

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

1. INTRODUÇÃO

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



Figura 1.1 – Localização do empreendimento

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

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS1		

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, o Ministério Público do Estado do Pará (MPPA), Ministério Público Federal (MPF), o Estado do Pará e a Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade do Estado do Pará, incluindo:

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

AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS1

- 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 DRS1

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 **revisão dos parâmetros geotécnicos de coesão e ângulo de atrito efetivo.**

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 resíduos DRS1.

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

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS1		

serviços, porque em alguns casos haviam 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 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 efetivamente consultados para avaliação nesse relatório são apresentados na Tabela 3.1.

AValiação DOS PARAMÉTRoS GEOTÉCNICOS DO DRS1
Tabela 3.1 – Documentos recebidos e utilizados na elaboração deste estudo

CÓDIGO	TÍTULO DO DOCUMENTO	ELABORADO POR	DATA
RT-8400-54-G-180	Relatório de Acompanhamento da Instrumentação da Linha freática referente a novembro e dezembro/2021	LPS	14/02/2022
-	Monitoramento da qualidade das águas subterrâneas do DRS1	HYDRO	08/02/2022
-	Resultados Hydro Alunorte 2021 a 2022 DRS2	HYDRO	08/02/2022
-	Níveis, Bordas Livres e Elevação das Bacias DRS1_DRS2_82F_2021	HYDRO	07/02/2022
-	NK03.01 - PM01-R0 - DRS1	HYDRO	07/02/2022
RT-3540-54-G-581	Relatório Técnico de Avaliação Periódica dos Resultados de Monitoramento da Instrumentação referente a outubro a dezembro/2021	PIMENTA DE AVILA	04/02/2022
RT-469137-54-G-0003 DRS1 RISR 2021.2	Relatório da Inspeção de Segurança Regular do DRS1 2021/2	GEOCONSULTORIA	11/01/2022
RT-3540-54-G-1014 R02	Relatório Técnico do Projeto “As Is”	PIMENTA DE AVILA	29/07/2021
RT-468603-54-L-0003 R0	Relatório de ensaios geotécnicos da fundação do DRS1 - Ensaios complementares	FUGRO	15/06/2021
RT-468603-54-L-0002 R00	Relatório de ensaios geotécnicos da fundação do DRS1	FUGRO	15/04/2021
HYD005-LAB-02	Relatório de Ensaios Geotécnicos de Laboratório	FUGRO	10/10/2019
HYD005-LAB-02	Ensaios de Laboratório realizados pela FUGRO	FUGRO	04/10/2019
PT-3540-54-G-480-R01	Parecer Técnico do Cross-Check do Projeto Básico da Camada de Conformação	PIMENTA DE AVILA	12/06/2019
RT-8400-54-G-058 R01	Relatório técnico consolidação dos ensaios de laboratório do aterro experimental	LPS	15/09/2017
CRT-7108	Campanha de investigação geológico-geotécnico no resíduo do filtro tambor depositado no DRS1	GEOFORMA	02/05/2017
MD-3540-54-G-091 R04	Memorial Descritivo do Projeto de Expansão do DRS Célula Leste	PIMENTA DE AVILA	01/07/2010

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS1		

CÓDIGO	TÍTULO DO DOCUMENTO	ELABORADO POR	DATA
AN-661-MD-20692-00	Estudos para Expansão do Depósito de Rejeitos	PIMENTA DE AVILA	07/01/2010
RT-3540-54-G-570-R01	Relatório de consolidação de dados do projeto "As Is"	PIMENTA DE AVILA	26/02/2021
TLF- 2881/03	Relatório de Ensaios Geotécnicos de Laboratório	GEOLABOR	14/07/2003
RT-3500-54-L-008 R00	Ensaios de Laboratório	FUGRO	14/02/2014
PT-8400-54-G-166 R02	Parecer técnico sobre ocupação da faixa 8	LPS	26/11/2021
PT-8400-54-G-167 R01	Parecer técnico sobre a complementação de ocupação das faixas 5 e 6	LPS	13/09/2021
PT-8400-54-G-173 R01	Parecer técnico - consolidação das investigações geotécnicas realizadas na cl3	LPS	14/10/2022
RT-8400-54-G-135 R01	Reabilitação do drs-1 alteamento das faixas 1 a 6 - Relatório de estudos geotécnicos	LPS	03/04/2020
Parâmetros Geotécnicos	E-mail da LPS à Hydro contendo explicações sobre os documentos onde constam interpretações de parâmetros dos rejeitos depositados no DRS 1	LPS	31/03/2023

4. ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

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

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

AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS1

- 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 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%.

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS1		

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).

AVALIAÇÃO DOS PARAMÊTROS GEOTÉCNICOS DO DRS1



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

A partir de 2003, com o projeto de implantação da célula 7, a PIMENTA DE AVILA assumiu a função de projetista do DRS1, responsabilizando-se pela elaboração dos projetos posteriores a esta data. Acrescenta-se que a nomenclatura “DRS1” passou a ser

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS1		

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 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.

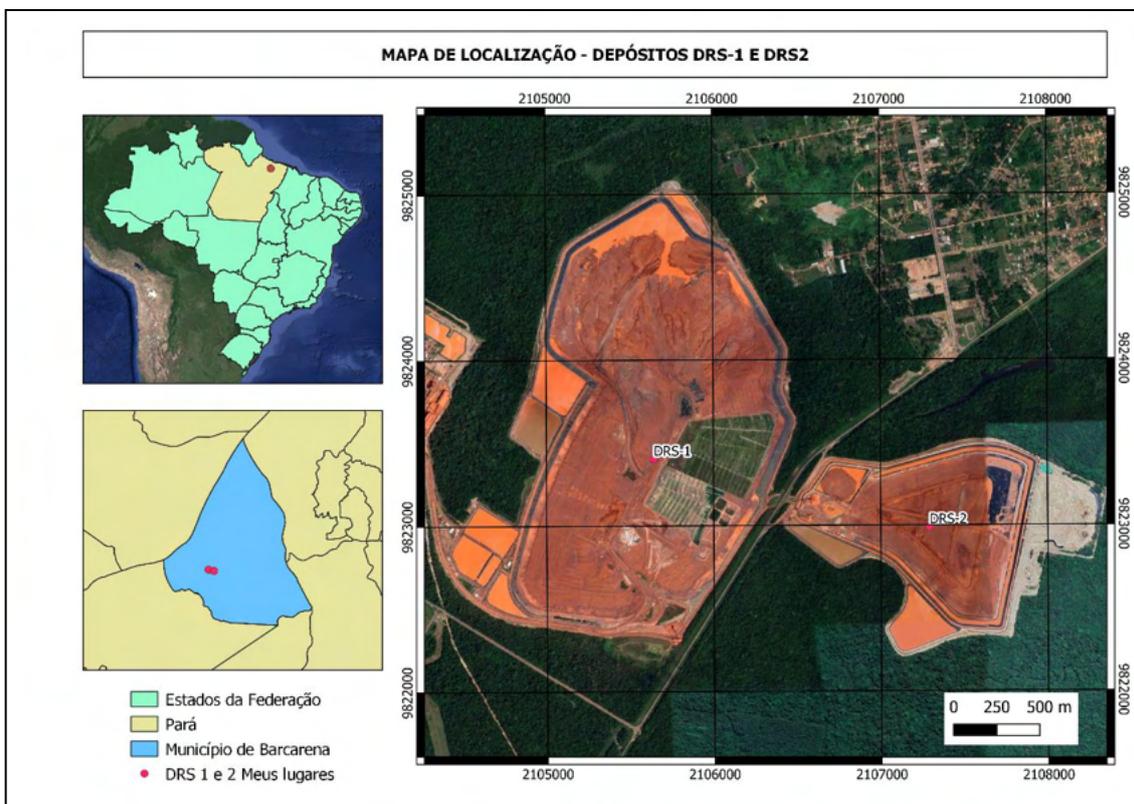
AVALIAÇÃO DOS PARAMÊTROS GEOTÉCNICOS DO DRS1


Figura 5.2 – Localização da Estrutura – DRS1 e DRS2

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

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

Segundo o levantamento censitário realizado pelo IBGE (2010), o município de Barcarena possui 99.859 habitantes., apresentando densidade demográfica de 76,21 habitantes por quilômetro quadrado. Conforme Figura 5.3, identificam-se as comunidades Água Verde, Boa Vista, Bom Futuro, Itupanema, J. Cabanos, J. Independência, J. Paraíso, Jardim das Palmeiras, Laranjal, Murucupi, Nazaré, Nossa Sra.

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS1		

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.

AVALIAÇÃO DOS PARAMÊTROS GEOTÉCNICOS DO DRS1

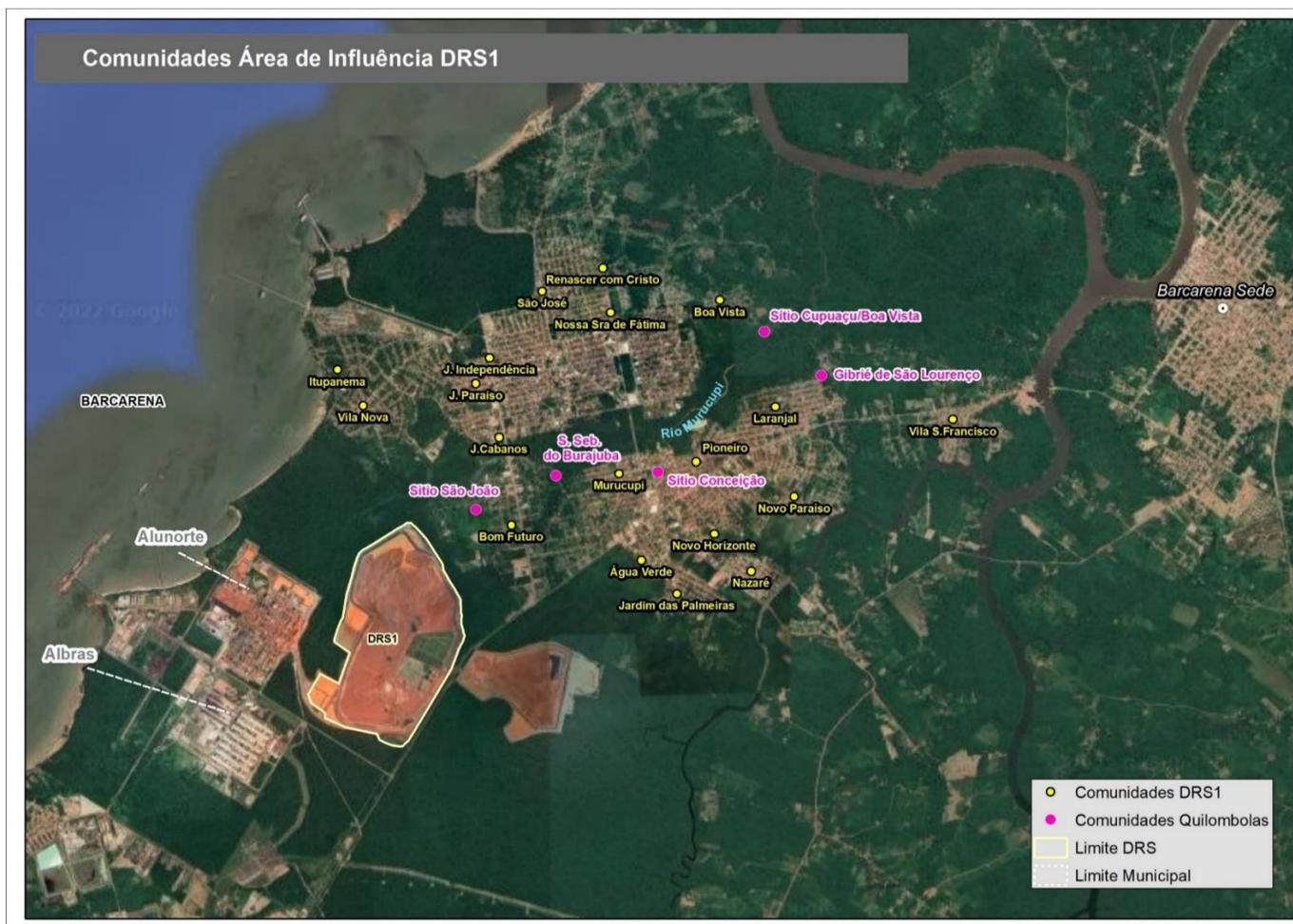


Figura 5.3 – Localização das comunidades próximas ao depósito DRS1 (Imagem fornecida pela equipe técnica da HYDRO/ALUNORTE)

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
AVALIAÇÃO DOS PARAMÊTROS GEOTÉCNICOS 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).

AVALIAÇÃO DOS PARAMÊTROS GEOTÉCNICOS DO DRS1



Figura 5.4 – Histórico de expansão do DRS1 e DRS2

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS1		

5.2 ASPECTOS GEOLÓGICOS

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

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

Ocupando uma área de aproximadamente 12000 m², que se estende desde a faixa litorânea entre as cidades de Bragança e Belém avançando para o interior do Pará, a Formação Pirabas ocorre sobreposta ao embasamento cristalino (Almaraz, 1977) e é caracterizada pela composição calcária e conteúdo fossilífero. A deposição se fez por evento transgressivo decorrente da subida do nível do mar em todo o planeta, durante o Mioceno (Haq *et al.* 1987). Sucedendo ao evento transgressivo que resultou na Formação Pirabas, ocorreu um evento de caráter regressivo o qual foi responsável pela sedimentação do Grupo Barreiras.

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

Admite-se como Sedimentos Pós Barreiras os depósitos que recobrem de maneira discordante os estratos da Formação Barreiras. Trata-se de areias consolidadas e semi-consolidadas de granulometria fina a média e coloração creme amarelada a branca,

AVALIAÇÃO DOS PARAMÊTROS GEOTÉCNICOS DO DRS1

podendo conter clastos e frações de argila (Farias *et al.* 1992). Segundo Rosseti e Valeriano. (2007), a evolução desses sedimentos está relacionada a um paleovale de idade quaternária alimentado pelo Rio Tocantins, quando esse corria para oeste do seu curso atual.

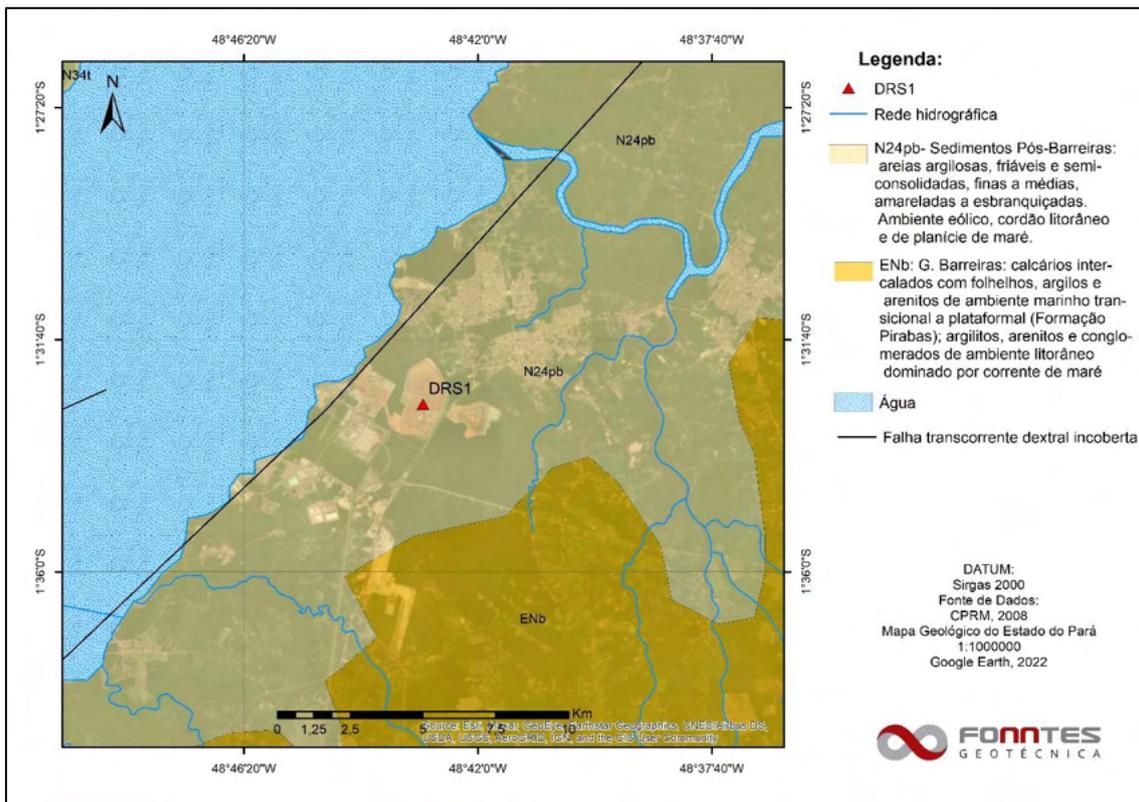


Figura 5.5 – Mapa geológico regional da estrutura DRS1

O relatório “As Is” RT-3540-54-G-1014 desenvolvido pela PIMENTA DE ÁVILA, apresenta as estruturas DRS1 e DRS2 inseridas sobre domínios da Formação/Grupo Barreiras, enquanto a Figura 5.5 indica que as duas estruturas estão inseridas sobre Sedimentos Pós-Barreiras. Levando em consideração o caráter regional do estudo, é natural que haja diferenças entre os estudos, devido principalmente a escala de 1:1.000.000 (Figura 5.5), não sendo essas consideradas inconsistências.

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
AVALIAÇÃO DOS PARAMÊTROS GEOTÉCNICOS DO DRS1		

5.2.1 Histórico de Investigações

A Tabela 5.1 apresenta uma síntese das investigações executadas na área de estudo.

Tabela 5.1 – Tabela resumo do histórico de investigação executada na área da estrutura DRS1

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

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
AVALIAÇÃO DOS PARAMÊTROS GEOTÉCNICOS DO DRS1		

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.

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

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

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

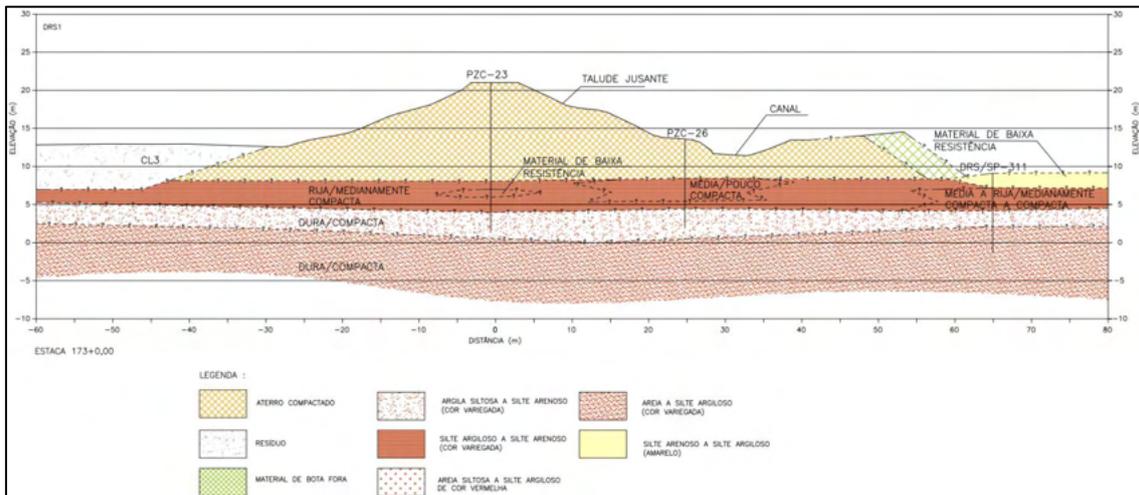
AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS1


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

5.3 DRENAGEM INTERNA

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

Os relatórios FG-2201-NHB-A-BA-RT11-00, 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.

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS1		

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

5.5 INSTRUMENTAÇÃO

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

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

5.6 FECHAMENTO DO DEPÓSITO DRS1

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

- uma camada de conformação com resíduo 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;

AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS1

- sistema de drenagem superficial definitivo, destinado à captação e coleta dos escoamentos de água de chuva e posterior encaminhamento para os canais periféricos limpos a serem construídos;
- sistema de drenagem subsuperficial robusto em cascalho e tubos drenantes na região do buffer, que se apoia sobre geotêxtil tecido sobre resíduo escavado e é sobreposta por uma camada de cobertura final de geotêxtil não tecido e geomembrana de PEAD.

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

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.

AVALIAÇÃO DOS PARAMÊTROS GEOTÉCNICOS DO DRS1

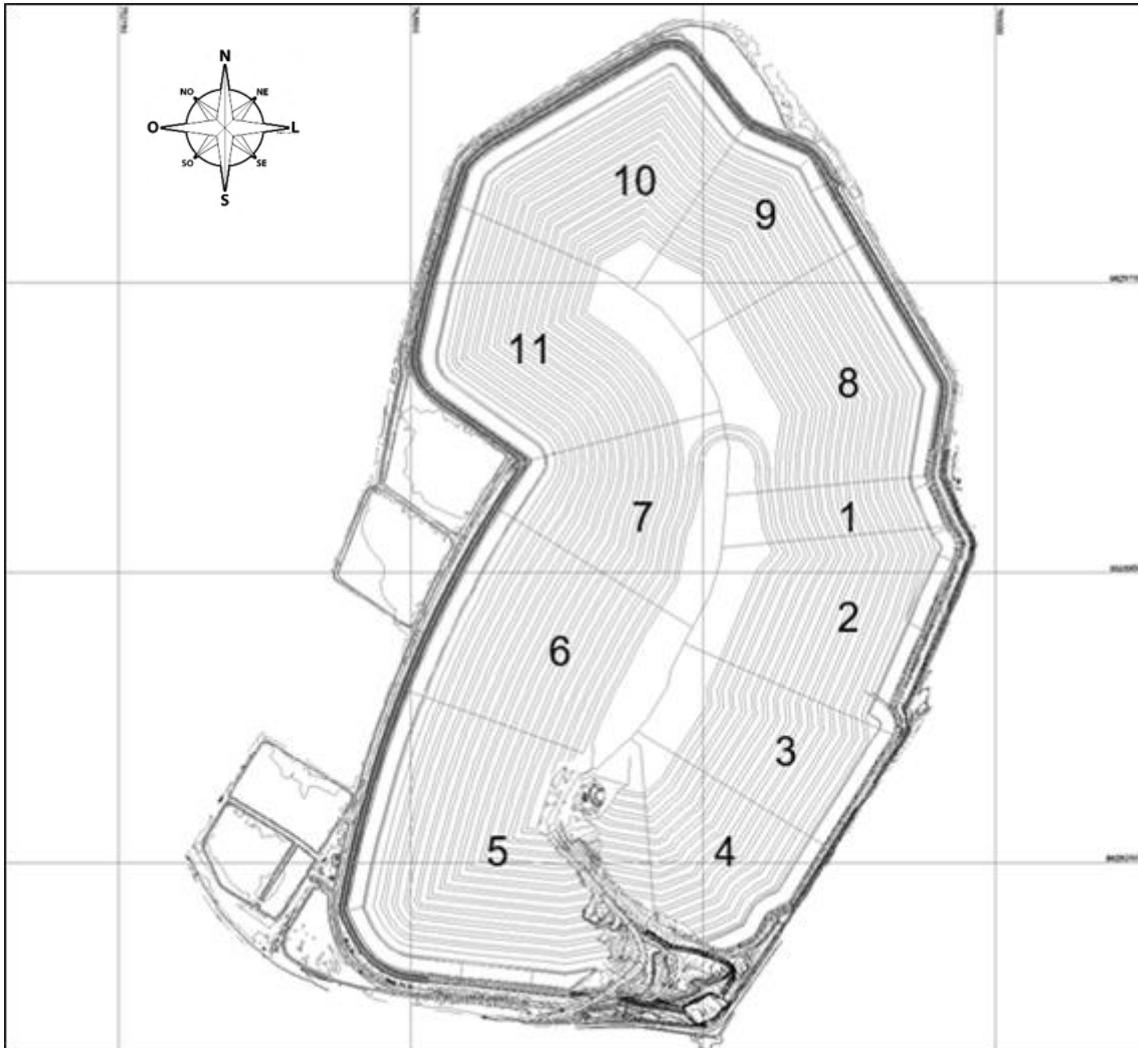


Figura 5.7 – Faixas de reabilitação do DRS1 (Doc. OM-8400-54-G-069 R01)

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.



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

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS1		

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, cisalhamento direto etc.), realizados a partir de amostras indeformadas ou moldadas em laboratório coletadas no material a que se quer estudar a 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.

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 2003, 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 no Depósito DRS1, bem como o quantitativo de amostras ensaiadas, são detalhadas nos subitens a seguir.

7.1.1 Campanha GEOLABOR (2003)

Conforme apresentado no Relatório de Ensaios Geotécnicos de Laboratório, elaborado pela GEOLABOR em julho/2003, doc. TLF- 2881/03, esta campanha contemplou ensaios geotécnicos de laboratório em amostras indeformadas da fundação e amostras deformadas dos resíduos sedimentados, para subsidiar o projeto dos diques do Depósito de Resíduos da ALUNORTE.

Os ensaios realizados nesta campanha são detalhados a seguir:

- Granulometria por peneiramento e sedimentação – 04 ensaios;
- Densidade real dos grãos – 04 ensaios;
- Limite de liquidez – 04 ensaios;
- Limite de plasticidade – 04 ensaios;
- Compactação proctor Normal – 04 ensaios;
- Permeabilidade carga variável – 04 ensaios;
- Adensamento edométrico com permeabilidade – 04 ensaios;
- Compressão triaxial R_{sat} – 12 ensaios.

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS1		

7.1.2 Campanha WS GEOTECNICA (2008)

Conforme indicado no Relatório de Consolidação de dados, elaborado pela PIMENTA DE AVILA em 26/02/2021, Doc. RT-3540-54-G-570 R01, a campanha de investigação geológico-geotécnica executada pela WS GEOTECNIA em 2008 teve como objetivo investigar a fundação anteriormente às expansões do Deposito DRS1 para leste.

Esta campanha contou com a execução de 18 furos de sondagens a percussão e ensaios de laboratório de compactação, umidade natural, granulometria completa, limites de consistência, densidade real dos grãos, permeabilidade, triaxial e adensamento. Entretanto, segundo o relatório da PIMENTA DE AVILA (2021), ao interpretar os resultados das investigações de campo e dos ensaios de laboratório, foram observadas inconsistência nos resultados. Portanto, a PIMENTA DE AVILA (2021) não considerou esta campanha para a elaboração do projeto de expansão CL1, CL2 e CL3.

7.1.3 Campanha FUGRO (2014)

Conforme indicado no Relatório de Consolidação de dados elaborado pela FUGRO, Doc. RT-3500-54-L-008 R00, os ensaios de laboratório realizados pela FUGRO, em 2014, foram realizados em amostras coletadas na área do Depósito DRS1 durante as investigações geológico-geotécnicas.

Nesta campanha foram coletadas amostras deformadas e indeformadas, totalizando 108 amostras para caracterização do solo e definição dos parâmetros de resistência.

A Tabela 7.1 apresenta o quantitativo de ensaios de laboratório realizados na Campanha FUGRO (2014).

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS1		

Tabela 7.1 – Relação de ensaios de laboratório executados na campanha FUGRO (2014)

Campanha	Ensaio	Quantidade de amostras ensaiadas
FUGRO 2014	Granulometria	21
	Limites de Atterberg	18
	Massa Específica Real dos Grãos	93
	Peso Específico Aparente	36
	Teor de Umidade	108
	Permeabilidade a Carga Variável	18
	Triaxial CIU	18
	Triaxial UU	15
	Adensamento	21
	Compactação	3

7.1.4 Campanha GEOMECÂNICA (2016)

O Relatório RT-5186-54-G-005, emitido pela GEOMECÂNICA em 23/06/2016, apresenta que foram coletados 4 blocos indeformados (Bloco 01 a Bloco 04) no terreno superficial do Depósito DRS2 para caracterização e determinação dos parâmetros de resistência da Fundação do Depósito DRS2. Devido à escassez de ensaios da fundação do Depósito DRS1 na época da elaboração do Projeto “As Is”, esta campanha foi utilizada pela PIMENTA DE AVILA (2021) para definição dos parâmetros de resistência da fundação do DRS1.

Nesta campanha foram executados os 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;

AVALIAÇÃO DOS PARAMÊTROS GEOTÉCNICOS DO DRS1

- 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.

7.1.5 Campanha GEOMECÂNICA (2016)

De acordo com o Relatório Técnico Consolidação dos Ensaios de Laboratório do Aterro Experimental do DRS1, emitido pela LPS em 15/09/17, doc. RT-8400-54-G-058 R01, no ano de 2016, a GEOMECÂNICA realizou uma campanha das investigações geotécnicas em blocos indeformados e amostras deformadas retirados do aterro experimental executado com material proveniente do filtro prensa para o desenvolvimento do projeto de Encerramento e Reabilitação do Depósito DRS1.

O Aterro Experimental foi construído em pistas com camadas soltas de 0,30 m, 0,40 m e 0,50 m de espessura, com o material disposto na umidade característica do resíduo filtrado e com acréscimos de 2%, 4% e 6% de umidade, com controle de compactação, de umidade, de número de passadas, tipo de equipamentos, produtividades etc.

As amostras indeformadas talhadas dos blocos indeformados foram coletadas na área teste conforme características de compactação descritas na Tabela 7.2.

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
AVALIAÇÃO DOS PARAMÊTROS GEOTÉCNICOS DO DRS1		

Tabela 7.2 – Condição de compactação (GEOMECÂNICA, 2016)

BLOCOS	CONDIÇÃO DE COMPACTAÇÃO		RAMO	DATA DA COLETA
	GC (%)	w (%)		
1	99,8	wot – 0,011	Seco	17/11/2016
2	84,9	wot + 0,027	Úmido	17/11/2016
3	102	wot – 0,033	Seco	17/11/2016
4	-	wot – 0,01	Seco	18/11/2016
5	-	wot + 0,003	Úmido	18/11/2016
6	-	wot – 0,011	Seco	18/11/2016
7	90,7	wot + 0,007	Ótimo	19/11/2016
8	96,8	wot + 0,04	Úmido	19/11/2016
9	90,8	wot + 0,046	Úmido	19/11/2016
10	-	wot + 0,082	Úmido	21/11/2016
11	96,4	wot – 0,011	Seco	21/11/2016
12	102,5	wot – 0,062	Seco	21/11/2016

Esta campanha de investigação incluiu a execução dos seguintes ensaios de laboratório: ensaios de caracterização completa, compactação Proctor normal, adensamento oedométrico com medida de permeabilidade, triaxiais CIU saturado, triaxiais UU não saturado, triaxiais PN e ensaios de permeabilidade com carga variável.

7.1.6 Campanha GEOFORMA (2017)

De acordo com o doc. CRT-7108, emitido pela GEOFORMA em 02/05/2017, a empresa realizou uma campanha de investigação geológico-geotécnica no resíduo do filtro tambor depositado no DRS1 no ano de 2017, incluindo a execução de ensaios de campo (Sondagem de Simples Reconhecimento – SPT, Sondagem de Piezocone – CPTu, Ensaio de Palheta – Vane Test) e ensaios de laboratório (teor de umidade natural, peso específico natural, adensamento oedométrico com permeabilidade, triaxial UU e triaxial CIU_{SAT}).

A Tabela 6.7 apresenta o quantitativo de ensaios de laboratório realizados na Campanha GEOFORMA (2017).

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS1		

Tabela 7.3 – Relação de ensaios de laboratório executados na campanha GEOFORMA (2017)

CAMPANHA	ENSAIO	QUANTIDADE DE AMOSTRAS ENSAIADAS	MATERIAL
GEOFORMA 2017	Peso Específico Natural e Seco	39	Resíduo do Filtro Tambor
	Umidade Natural	39	
	Adensamento	16	
	Triaxial UU	10	
	Triaxial CIU	4	

7.1.7 Campanha FUGRO (2019)

De acordo com o Relatório de ensaios geotécnicos de laboratório, emitido pela FUGRO em outubro/2019, doc. HYD005-LAB-02, a HYDRO solicitou a coleta de amostras para realização de ensaios triaxiais e ensaios de caracterização do resíduo do filtro tambor.

Os ensaios de laboratório realizados pela FUGRO em 2019 consistiram em: adensamento, cisalhamento direto simples, teor de umidade, ensaios de compressão triaxial drenados e não drenados. A Tabela 7.4 apresenta o quantitativo de ensaios realizados.

Tabela 7.4 - Relação de ensaios de laboratório executados na campanha FUGRO (2019)

CAMPANHA	ENSAIO	QUANTIDADE DE AMOSTRAS ENSAIADAS	MATERIAL
FUGRO 2019	Adensamento	13	Resíduo de Filtro Tambor
	Cisalhamento Direto simples	4	
	Teor de Umidade	214	
	Triaxial CIU	2	
	Triaxial CID	8	

7.1.8 Campanha FUGRO (2021)

Conforme descrito no relatório da FUGRO emitido em outubro/2021, doc. RT-468603-54-L-0002 R01, a HYDRO solicitou a realização de ensaios de laboratório para

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
AVALIAÇÃO DOS PARAMÊTROS GEOTÉCNICOS DO DRS1		

investigações geológico-geotécnicas da fundação do Depósito DRS1. A Tabela 7.5 apresenta a relação de amostras ensaiadas nessa campanha.

Tabela 7.5 - Quantidade de ensaios realizados (FUGRO, 2021)

CAMPANHA	ENSAIO	QUANTIDADE DE AMOSTRAS ENSAIADAS	MATERIAL
Fugro 10/2021	Granulometria	7	Fundação
	Limites de Attemberg	7	
	Massa Específica Real dos Grãos	7	
	Triaxial CIU	4	
	Triaxial CID	4	
	Cisalhamento Direto simples	2	
	Adensamento unidimensional	4	

Na Tabela 7.6, estão apresentadas a relação de amostras e ensaios executados.

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS1		

Tabela 7.6 - Identificação das amostras da fundação (FUGRO, 2021)

FURO	AMOSTRA	TIPO DE AMOSTRA	PROFUNDIDADE (m)	REGISTRO LABORATÓRIO
FUND-PI-AMD-01	1	BAG	3,5 a 4,1 m	S19949
FUND-PI-AMD-02	1	BAG	5 a 5,6 m	S19950
FUND-PI-AMI-AMD-02	1	Shelby (PUS)	5 a 5,6 m	S19951
FUND-PI-AMI-AMD-02	2	Shelby (PUS)	5 a 5,6 m	S19952
FUND-PI-AMI-AMD-02	3	Shelby (PUS)	5 a 5,6 m	S19953
FUND-PI-AMD-03	1	BAG	3,2 a 3,8 m	S19954
FUND-PI-AMI-AMD-03	1	Shelby (PUS)	2 a 2,6 m	S19955
FUND-PI-AMI-AMD-03	2	Shelby (PUS)	2,6 a 3,2 m	S19956
FUND-PI-AMI-AMD-03	3	Shelby (PUS)	3,2 a 3,8 m	S19957
FUND-PI-AMI-AMD-03	3	Shelby (PUS)	3,2 a 3,8 m	S19958
FUND-PI-AMI-AMD-03	3	Shelby (PUS)	3,2 a 3,8 m	S19959
FUND-AMIP-03	1	Shelby (PUS)	5,6 a 6,2 m	S19960
FUND-AMIP-03A	2	Shelby (PUS)	6,2 a 6,8 m	S19961
FUND-AMIP-03B	3	Shelby (PUS)	6,8 a 7,4 m	S19962
FUND-PI-AMD-04	1	BAG	3,5 a 4,1 m	S19963
FUND-PI-AMD-05	1	BAG	3,5 a 4,1 m	S19964
FUND-AMIP-10	1	Shelby (PUS)	10 a 10,6 m	S19965

Nesta campanha, foram executados ensaios de ensaios granulometria completa, massa específica real dos grãos, limites de Atterberg, ensaio triaxial consolidado isotropicamente e não drenado (CIU), ensaio triaxial consolidado isotropicamente e drenado (CID), ensaio DSS e adensamento unidimensional.

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS1		

Complementarmente, foram realizados ensaios pela FUGRO para esta campanha no mês de junho de 2021. A descrição dos ensaios de laboratório desta campanha é apresentada no relatório Doc. RT-468603-54-L-0003 R0.

Esta campanha contempla a execução de ensaios de caracterização do solo (granulometria, teor de umidade, limites de Attemberg e massa específica real dos grãos), além de ensaios de compressão triaxial adensados drenados (CIU), não drenados (CID) e não adensado não drenados (UU), para definição dos parâmetros de resistência do solo. Também foi realizada a determinação do teor de umidade aplicado as amostras oriundas do amostrador do SPT, totalizando 78 amostras. A relação da quantidade de ensaios realizados está apresentada na Tabela 7.7.

Tabela 7.7 - Quantidade de ensaios realizados

CAMPANHA	ENSAIO	QUANTIDADE DE AMOSTRAS ENSAIADAS	MATERIAL
FUGRO 06/2021	Granulometria	13	Fundação
	Teor de Umidade	13	
	Limites de Attemberg	13	
	Massa Específica Real dos Grãos	13	
	Triaxial CIU	4	
	Triaxial CID	2	
	Triaxial UU	11	
	Cisalhamento Direto simples	5	
Adensamento unidimensional	18		

Na Tabela 7.8, estão apresentadas a relação de amostras de fundação coletadas nesta campanha.

Tabela 7.8 - Identificação das amostras de solo

FURO	AMOSTRA	TIPO DE AMOSTRA	PROFUNDIDADE (m)	REGISTRO LABORATÓRIO
P3-F7	1	Shelby (PUS)	5 a 5,6 m	S20083
P3-F7	2	Shelby (PUS)	10 a 10,6 m	S20084

AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS1

FURO	AMOSTRA	TIPO DE AMOSTRA	PROFUNDIDADE (m)	REGISTRO LABORATÓRIO
P3-F7	3	Shelby (PUS) _ Amostra Gêmea	10 a 10,6 m	S20085
P3-F7	4	Shelby (PUS)	15 a 15,6 m	S20086
P6-F7	1	Shelby (PUS)	3 a 3,6 m	S20087
P6-F7	2	Shelby (PUS) _ Amostra Gêmea	3 a 3,6 m	S20088
P7-F7	1	Shelby (PUS)	7 a 7,6 m	S20089
P7-F7	2	Shelby (PUS)	13 a 13,6 m	S20090
P7-F7	3	Shelby (PUS)	25 a 25,6 m	S20091
P9-F7	1	Shelby (PUS)	3 a 3,6 m	S20092
P9-F7	2	Shelby (PUS) _ Amostra Gêmea	3 a 3,6 m	S20093
P9-F7	3	Shelby (PUS)	6 a 6,6 m	S20094
P9-F7	4	Shelby (PUS) _ Amostra Gêmea	6 a 6,6 m	S20095
P9-F7	5	Shelby (PUS)	12 a 12,6 m	S20096
P9-F7	6	Shelby (PUS) _ Amostra Gêmea	12 a 12,6 m	S20097
P1-F8	1	Shelby (PUS)	4 a 4,6 m	S20098
P1-F8	2	Shelby (PUS) _ Amostra Gêmea	4 a 4,6 m	S20099
P1-F8	3	Shelby (PUS)	8 a 8,6 m	S20100
P1-F8	4	Shelby (PUS) _ Amostra Gêmea	8 a 8,6 m	S20101
P1-F8	5	Shelby (PUS)	9 a 9,6 m	S20102
P1-F8	6	Shelby (PUS) _ Amostra Gêmea	9 a 9,6 m	S20103
P1-F8	7	Shelby (PUS)	12 a 12,6 m	S20104
P1-F8	8	Shelby (PUS) _ Amostra Gêmea	12 a 12,6 m	S20105
P2-F8	1	Shelby (PUS)	5 a 5,6 m	S20106
P2-F8	2	Shelby (PUS) _ Amostra Gêmea	5 a 5,6 m	S20107
P5-F8	1	Shelby (PUS)	5 a 5,6 m	S20108
P5-F8	2	Shelby (PUS) _ Amostra Gêmea	5 a 5,6 m	S20109
P2-F5	1	Shelby (PUS)	2 a 2,6 m	S20213
P2-F5	1	Shelby (PUS) _ Amostra Gêmea	2 a 2,6 m	S20214
P2-F5	2	Shelby (PUS)	4 a 4,6 m	S20215

AVALIAÇÃO DOS PARAMÊTROS GEOTÉCNICOS DO DRS1

FURO	AMOSTRA	TIPO DE AMOSTRA	PROFUNDIDADE (m)	REGISTRO LABORATÓRIO
P3-F5	1	Shelby (PUS)	3 a 3,6 m	S20216
P3-F5	1	Shelby (PUS) _ Amostra Gêmea	3 a 3,6 m	S20217
P3-F5	2	Shelby (PUS)	5 a 5,6 m	S20218
P3-F5	2	Shelby (PUS) _ Amostra Gêmea	5 a 5,6 m	S20219
P5-F5	1	Shelby (PUS)	3 a 3,6 m	S20220
P5-F5	1	Shelby (PUS) _ Amostra Gêmea	3 a 3,6 m	S20221
P5-F5	2	Shelby (PUS)	5,5 a 6,1 m	S20222
P5-F5	2	Shelby (PUS) _ Amostra Gêmea	5,5 a 6,1 m	S20223
P6-F5	1	Shelby (PUS)	5,8 a 6,4 m	S20224
P6-F5	1	Shelby (PUS) _ Amostra Gêmea	5,8 a 6,4 m	S20225
P2-F7	1	Shelby (PUS)	3 a 3,6 m	S20226
P2-F7	1	Shelby (PUS) _ Amostra Gêmea	3 a 3,6 m	S20227
P2-F7	2	Shelby (PUS)	7 a 7,6 m	S20228
P4-F8	1	Shelby (PUS)	3 a 3,6 m	S20229
P4-F8	1	Shelby (PUS) _ Amostra Gêmea	3 a 3,6 m	S20230
P4-F8	2	Shelby (PUS)	6 a 6,6 m	S20231
P4-F8	2	Shelby (PUS) _ Amostra Gêmea	6 a 6,6 m	S20232

Ademais, a campanha também realizou, no mês de setembro de 2021, investigações geotécnicas realizadas com sondagem de simples reconhecimento, ensaios de piezocone – CPTu com medida de velocidade de onda de cisalhamento – (V_s), ensaios de dissipação de poropressão – DPP, ensaios de palheta – Vane Test e coletas de amostras deformadas executados a serviço da Alunorte Alumina do Norte do Brasil, pelo laboratório da Fugro In Situ.

A presente campanha de investigação compreendeu em:

- Dezesesseis (16) sondagens a percussão;
- Vinte e oito (28) verticais de piezocone – CPTu;
- Cinquenta e quatro (54) ensaios de dissipação de poropressão – DPP;

AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS1

- Cinquenta e cinco (55) ensaios de medida de velocidade de onda de cisalhamento distribuídos em vinte e um (21) verticais;
- Noventa e dois (92) ensaios de palheta – VT, distribuídos em quinze (15) verticais;
- Cinquenta e seis (56) coletas deformadas, distribuídas em treze (13) verticais.

7.2 PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA ADOTADOS NO RISR DO 2º CICLO/2022

O estudo mais recente realizado na estrutura e disponibilizado para a FONNTES foi o Relatório da Inspeção de Segurança Regular do DRS1, elaborado pela GEOCONSULTORIA em junho de 2022, documento RT-469137-54-G-0003-rev02. Conforme indicado nesse documento, para o desenvolvimento das análises de estabilidade, foram considerados os parâmetros de resistência já determinados e adotados pelas empresas projetistas Pimenta de Ávila (Projeto As Is, número RT-3540-54-G-1014-rev2, de 29/07/2021) e LPS (Relatório Técnico Consolidação das Investigações Geotécnicas, documento RT-8400-54-G-059-rev1, de 14/09/2017, Projeto RT-8400-54-G-064-rev5, de 10/10/2017 e Relatório Técnico Cartas de Controle do DRS1, documento RT-8400-54-G-155-rev3, de 23/06/2020).

A Tabela 7.9 apresenta os parâmetros de resistência adotados nas análises de estabilidade pela LPS, 2017, no Documento RT-8400-54-G-059-rev1, Relatório Técnico Consolidação das Investigações Geotécnicas. A Tabela 7.10 apresenta os parâmetros de resistência adotados nas análises de estabilidade pela LPS, 2020, no Documento RT-8400-54-G-155-rev3, Relatório Técnico Consolidação das Investigações Geotécnicas. A Tabela 7.11 apresenta os parâmetros de resistência adotados nas análises de estabilidade pela Pimenta de Ávila, 2021, no Documento RT-3540-54-G-1014, Projeto AS IS.

AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS1
Tabela 7.9 – Parâmetros de Resistência adotados nas análises de estabilidade pela LPS, 2017, no Documento RT-8400-54-G-059-rev1, Projeto AS IS.

MATERIAL	Su min (kPa)	Δ Su (kPa/m)
Rejeito Filtro-Tambor (parte alta até 2,5 m do resíduo)	18	-
Rejeito Filtro-Tambor (parte alta após 2,5 m do resíduo)	18	2,5
Rejeito Filtro-Tambor (parte intermediária até 3,0 m do resíduo)	30	-
Rejeito Filtro-Tambor (parte intermediária após 3,0 m do resíduo)	30	2,0
Rejeito Filtro-Tambor (parte baixa até 3,0 m do resíduo)	14	-
Rejeito Filtro-Tambor (parte baixa após 3,0 m do resíduo)	14	3,5
Rejeito da área do buffer ¹	14	-
Rejeito da área do Buffer ¹	14	3,5

Tabela 7.10 – Consolidação das investigações geotécnicas, Documento RT-8400-54-G-155-rev3, Relatório Técnico Cartas de Controle do DRS1.

MATERIAL	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	Φ'_p (°)	Ru
Fundação	18,5	5	28	-
Camada de conformação (cobertura)	19,5	5	27	-
Aterro compactado (Diques)	19,5	5	27	-
Rejeito Filtro-Prensa	19	7	34,1	0,27
Rejeito Filtro-Tambor (parte alta)	18	6	35	-
Rejeito Filtro-Tambor (parte intermediária)	18	0	33	-
Rejeito Filtro-Tambor (parte baixa)	18	0	29	-
Rejeito da área do Buffer	18	0	26	-

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS1		

Tabela 7.11 – Parâmetros de Resistência adotados nas análises de estabilidade pela Pimenta de Ávila, 2021, no Documento RT-3540-54-G-1014-rev2, Projeto AS IS.

MATERIAL	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	Φ'_p (°)	Su (kPa)	Su/ σ'
Resíduo de Filtro Tambor Porção Sul e Central	18,2	2	37	18+0,40. σ' v	-
Resíduo de Filtro Tambor Porção Norte	18,2	2	37	6+0,22. σ' v	-
Resíduo de Filtro Prensa	19,6	0	37	-	-
Aterro Compactado	19,5	5	27	-	-
Baixa Resistência	17,8	-	25,5	mín. 20	0,24
Médio/med. Compacto	18,7	-	28,3	mín. 20	0,25
Rijo/med. Compacto	19,1	-	30,9	-	-
Duro/Compacto	20,8	-	36,4	-	-
Areia Siltosa	20,8	-	35,7	-	-
Areia Siltosa Pouco Compacta	19,7	-	28,7	-	-
Reaterro	18,7	-	30,1	-	-
Bota Fora - Célula Sul	18,2	-	25,3	mín. 20	0,24

Foi realizada uma comparação entre os parâmetros de resistência adotados nas análises de estabilidade pela GEOCONSULTORIA, 2022, no Documento RT-469137-54-G-0003-rev02, Relatório da Inspeção de Segurança Regular do DRS1 (Tabela 7.12), com os adotados pela LPS e Pimenta de Ávila (Tabela 7.9, Tabela 7.10 e Tabela 7.11, respectivamente). Como resultado, foi verificado que a GEOCONSULTORIA (2022) adotou parâmetros de resistência similares à PIMENTA DE ÁVILA (2021) para o aterro e a fundação e parâmetros de resistência similares à LPS (2020) para os resíduos de Filtro Tambor e Filtro Prensa.

AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS1

Tabela 7.12 – Parâmetros de Resistência adotados nas análises de estabilidade pela GEOCONSULTORIA, 2022, no Documento RT-469137-54-G-0003-rev02, Relatório da Inspeção de Segurança Regular do DRS1.

MATERIAL	γ (kN/m ³)	C' (kPa)	Φ' (°)	Su min (kPa)	Su/ σ'	ΔSu (kPa/m)	Ru	Referência
Aterro compactado	19,5	5	27	-	-	-	-	Pimenta de Ávila (2021)
Rijo/med. Compacto	19,1	0	30,9	-	-	-	-	Pimenta de Ávila (2021)
Duro/Compacto	20,8	0	36,4	-	-	-	-	Pimenta de Ávila (2021)
Médio/med. Compacto	18,7	0	28,3	20	0,25	-	-	Pimenta de Ávila (2021)
Areia Siltosa	20,8	0	35,7	-	-	-	-	Pimenta de Ávila (2021)
Baixa Resistência	17,8	0	25,5	20	0,24	-	-	Pimenta de Ávila (2021)
Bota Fora	18,2	0	25,3	20	0,24	-	-	Pimenta de Ávila (2021)
Rejeito da área do Buffer	18	0	26	-	-	-	-	LPS (2020)
	-	-	-	*	-	*	-	LPS (2017)
Rejeito filtro-tambor (parte baixa, 0 a 3 m)	18	0	29	-	-	-	-	LPS (2020)
	-	-	-	14	-	-	-	LPS (2017)
Rejeito filtro-tambor (parte baixa, abaixo de 3 m)	18	0	29	-	-	-	-	LPS (2020)
	-	-	-	14	-	3,5	-	LPS (2017)
Rejeito filtro-tambor (parte intermediária, 0 a 3 m)	18	0	33	-	-	-	-	LPS (2020)
	-	-	-	30	-	-	-	LPS (2017)
Rejeito filtro-tambor (parte intermediária, abaixo de 3 m)	18	0	33	-	-	-	-	LPS (2020)
	-	-	-	30	-	2,0	-	LPS (2017)
Rejeito filtro-tambor (parte alta, 0 a 2,5 m)	18	6	35	-	-	-	-	LPS (2020)
	-	-	-	18	-	-	-	LPS (2017)
Rejeito filtro-tambor (parte alta, abaixo de 2,5 m)	18	6	35	-	-	-	-	LPS (2020)
	-	-	-	18	-	2,5	-	LPS (2017)
Rejeito filtro-prensa	19	7	34,1	-	-	-	0,27	LPS (2017)

No Projeto As Is, a PIMENTA DE AVILA (2021) indica que embora tenham sido executados ensaios triaxiais do tipo Rsat a partir da talhagem das amostras indeformadas (blocos) coletados na Campanha de 2003, a representatividade desses ensaios dos materiais da fundação é baixa. Portanto, a PIMENTA DE AVILA utilizou os

AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS1

ensaios SPT realizados no depósito ao longo de suas expansões para definição dos parâmetros de resistência dos materiais do Depósito DRS1, exceto os materiais da fundação.

A partir da avaliação das condições de consistência e compactidade dos ensaios com base nos resultados de N_{spt} para diferentes profundidades, os materiais silto-arenosos a argilo-siltosos de fundação foram agrupados conforme apresentado a seguir:

- $N_{spt} \leq 5$; material de baixa resistência;
- $5 < N_{spt} \leq 10$; material médio/pouco a medianamente compacto;
- $10 < N_{spt} \leq 20$; material rijo/medianamente compacto a compacto;
- $20 < N_{spt}$; material muito rijo a duro/compacto a muito compacto.

O material predominantemente arenoso em maior profundidade foi tratado separadamente desses.

Em posse da classificação das zonas de consistência / compactidade relativa e a posição do nível freático no meio foram estabelecidos os contatos entre os materiais e seus respectivos parâmetros geotécnicos (peso específico, parâmetros de resistência e parâmetros de permeabilidade).

Para a determinação do peso específico dos materiais da fundação do DRS1, os parâmetros foram estimados conforme a classificação empírica proposta por Godoy (1972, *apud* Cintra, 2011).

Para a obtenção dos parâmetros de resistência drenados a partir de ensaios SPT, foram avaliadas quatro metodologias distintas para a determinação dos parâmetros efetivos, devido às incertezas associadas à heterogeneidade do material em campo. As correlações adotadas para a estimativa do ângulo de atrito foram elaboradas por Teixeira (1996), Hatanaka e Uchida (1996), Wolf (1989) e Kulhawy e Mayne (1990).

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS1		

Para a obtenção dos parâmetros de resistência não drenados a partir de ensaios SPT, a PIMENTA DE AVILA considerou a correlação empírica proposta por Sadrekarimi (2014) para determinação da razão de resistência não drenada de pico para um esforço de compressão. Os parâmetros não drenados foram determinados tomando, de forma conservadora, o limite inferior dos valores equivalentes à média geral subtraída de um desvio padrão.

Para a definição dos parâmetros de resistência, os materiais de baixa resistência e materiais médios/pouco a medianamente compactos foram tratados com parâmetros não drenados para a camada totalmente saturada e com parâmetros efetivos para a porção que se encontra acima da linha freática, onde a geração de poropressão não é significativa. Para os demais materiais, foram atribuídos apenas parâmetros drenados.

A interpretação completa para a definição dos parâmetros de resistência dos materiais da fundação é apresentada no Projeto As Is, elaborado pela PIMENTA DE ÁVILA em 29/07/2021, doc. RT-3540-54-G-1014 R02.

A interpretação dos parâmetros não drenados das diferentes subdivisões dos rejeitos do filtro tambor, de acordo com sua resistência, foi esclarecido em e-mail enviado pela projetista LPS à Hydro no âmbito dessa auditoria e recebido pela FONNTES para conhecimento. A interpretação desses materiais foram realizadas pelo subsidio de diferentes campanhas de ensaios e investigações realizada para essa finalidade, dividida por diferentes regiões da estrutura. Os relatórios PT-8400-54-G-166 R02, PT-8400-54-G-167 R01, PT-8400-54-G-173 R01, RT-8400-54-G-135 R01, todos elaborados pela LPS, apresentam os estudos de interpretação dos ensaios, especialmente os ensaios CPTu e palheta, realizados para estudo do comportamento não drenado dos rejeitos. Pela consulta dos dados no âmbito dessa auditoria foi possível constatar que a metodologia de avaliação segue práticas atuais para esse tipo de avaliação e os resultados também

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS1		

são compatíveis com o esperado para os rejeitos. O uso de ensaios CPTu é o mais adequado para estudo de comportamento não drenado dos rejeitos, e foi o utilizado pela projetista para avaliação, juntamente com ensaios do tipo palheta. Quanto aos parâmetros drenados dos rejeitos, não se localizou um documento com a sua interpretação ou explicação. Entretanto, é possível afirmar que os valores utilizados são compatíveis com outros rejeitos similares e esperados de acordo com os valores dos parâmetros não drenados.

7.3 AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA DOS PARÂMETROS

Neste item, é realizado um compilado dos resultados dos ensaios de compressão triaxial realizados para o Depósito DRS1. Destaca-se que neste item será realizada a avaliação dos parâmetros de resistência drenados dos materiais através dos 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

Como o Projeto As Is apresentou os parâmetros da fundação em função dos ensaios SPT, a avaliação dos parâmetros de resistência da fundação levará em consideração as análises realizadas pela PIMENTA DE AVILA no Parecer Técnico do Cross-Check do Projeto Básico da Camada de Conformação, emitido em 12/06/2019, doc. PT-3540-54-G-480-R01.

Para a avaliação dos parâmetros de resistência da fundação, a FONNTES analisou os ensaios triaxiais tipo CIU_{SAT} da campanha de investigação realizada pela GEOMECÂNICA na fundação do DRS2 em 2016, na qual foram coletadas quatro amostras indeformadas no terreno superficial para a execução de ensaios de laboratório.

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS1		

Destaca-se que a interpretação individual dos ensaios executados pela GEOMECÂNICA em 2016, foi consultada a partir dos resultados dos ensaios CIU_{SAT} cujos parâmetros foram verificados pelo laboratório para a envoltória da máxima tensão desviadora. Portanto, a Tabela 7.13 apresenta os parâmetros de resistência das amostras de fundação obtidos nos ensaios na máxima tensão desviadora, interpretados pela FONNTES.

Tabela 7.13 – Avaliação Estatística dos Ensaios Triaxiais da Fundação do DRS2.

MATERIAL	CAMPANHA	AMOSTRA	PESO ESP. γ (kN/m ³)	COESÃO c (kPa)	ÂNGULO DE ATRITO ϕ (°)
FUNDAÇÃO	GEOMECÂNICA (2016)	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
MÉDIA	-	-	18,0	15,6	21,8
DESV. PAD.	-	-	0,733	8,99	4,71

Para a definição dos parâmetros de resistência, a PIMENTA DE AVILA realizou a análises conjunta dos ensaios triaxiais CIU_{SAT} executados na Fundação, traçando-se um único gráfico p' x q para o material, indicado na Figura 7.1.

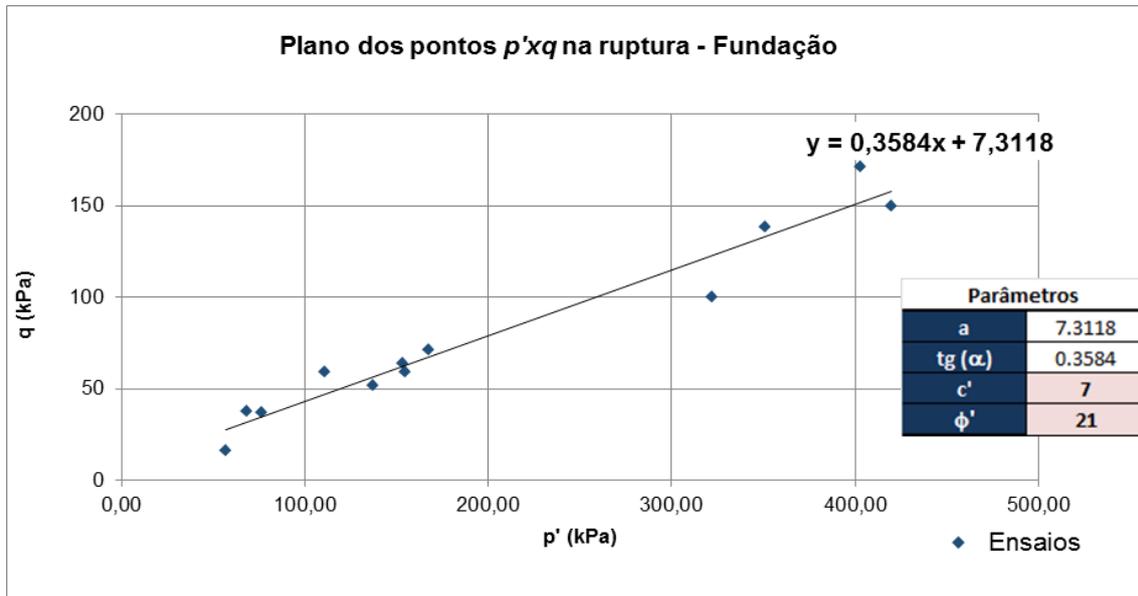
AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS1


Figura 7.1 – Parâmetros de resistência efetivos da fundação – Ensaios triaxiais CU_{sat} – Critério da máxima tensão desviadora (PIMENTA DE AVILA, 2018).

Observa-se que houve uma diferença considerável entre os parâmetros de resistência da fundação adotados pela PIMENTA DE AVILA em 2019 ($c'=7$ kPa e $\phi'=21^\circ$) e os parâmetros de resistência obtidos na Tabela 7.13 ($c'=16$ kPa e $\phi'=22^\circ$). Os parâmetros adotados no projeto estão mais conservadores.

De modo a validar a análise da PIMENTA DE ALIVA (2018), a FONNTES realizou a interpretação conjunta dos ensaios triaxiais executados pela GEOMECÂNICA em 2015. Como se pode observar na Figura 7.2, a análise conjunta da FONNTES forneceu resultados parecidos com os obtidos pela FONNTES na Tabela 7.13. A interpretação da FONNTES na Figura 7.2 resultou em um aumento de 7 kPa na coesão efetiva e 1° (1 grau) no ângulo de atrito efetivo em relação a interpretação da PIMENTA DE AVILA (2018), indicando que os parâmetros adotados pela PIMENTA DE AVILA nas análises de estabilidade foram mais conservadores.

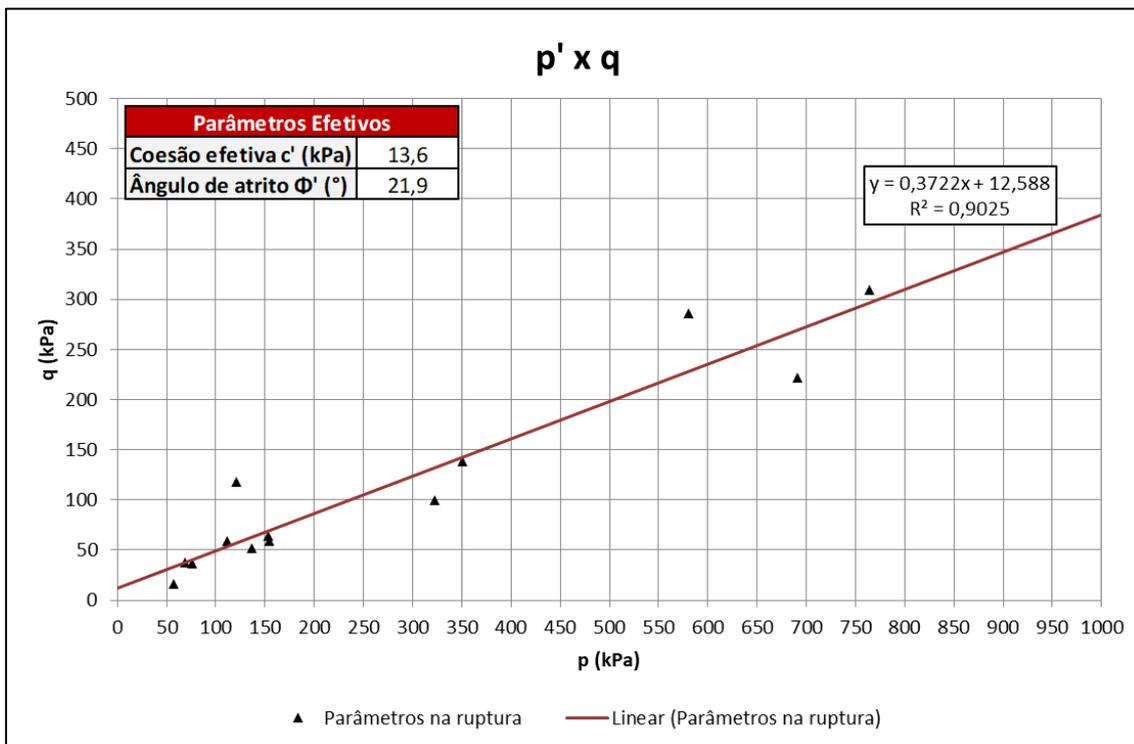
AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS1


Figura 7.2 – Determinação dos parâmetros de resistência efetivos da Fundação do DRS2, a partir da avaliação conjunta dos ensaios triaxiais CIUSat executados pela GEOMECÂNICA em 2016

Destaca-se que no ano de 2021 a FUGRO realizou uma campanha de INVESTIGAÇÕES GEOLÓGICO-GEOTÉCNICAS para estudar a fundação do Depósito DRS1, que é apresentada nos relatórios RT-468603-54-L-0002 R00 e RT-468603-54-L-0003 R00, elaborados pela FUGRO em 15/04/21 e 15/06/21, respectivamente. Tendo em vista que o resultado da campanha foi disponibilizado em uma data próxima à emissão final do Projeto “As Is”, emitido pela PIMENTA DE ÁVILA em 29/07/2021, doc. RT-3540-54-G-1014 R02, essa campanha não foi utilizada para definição dos parâmetros de resistência do referido documento. Entende-se, portanto, que o projeto “As Is” poderá ser objeto de atualização/revisão quando da finalização da campanha complementar de investigação da fundação do DRS1.

A FONNTES apresenta na Tabela 7.14 o compilado dos ensaios triaxiais CIUSAT e CIDSAT realizados pela FUGRO em 2021. A interpretação individual dos ensaios executados pela FUGRO, foi consultada a partir dos resultados dos ensaios CIUSAT obtidos na ruptura dos

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS1		

corpos de prova, cujos parâmetros de resistência das amostras da fundação foram obtidos.

Tabela 7.14 – Parâmetros de resistência obtidos na campanha FUGRO (2021) na fundação do DRS1

CAMPANHA	AMOSTRA	PROF. (m)	PESO ESP. γ (kN/m ³)	COESÃO c (kPa)	ÂNGULO DE ATRITO ϕ (°)	ENSAIO
FUGRO 2021	FUND-PI-AMI-AMD-02	5 a 5,6	18,5	0,0	29,5	CID
	FUND-PI-AMI-AMD-03	2 a 2,6	20,9	8,3	32,7	CID
	FUND-AMIP-03	5,6 a 6,2	18,4	0,0	30,6	CID
	FUND-AMIP-10	10 a 10,6	18,5	40,1 ¹	26,4 ¹	CID
	FUND-PI-AMI-AMD-02	5 a 5,6	18,8	27,3 ¹	15,9 ¹	CIU
	FUND-PI-AMI-AMD-03	2 a 2,6	20,2	69,1 ¹	13,7 ¹	CIU
	FUND-AMIP-03	5,6 a 6,2	19,6	13,2	24,1	CIU
	FUND-AMIP-10	10 a 10,6	19,3	5,9	30,8	CIU
	P2-F5	4 a 4,6	18,8	11,9	37,4	CID
	P4-F8	3 a 3,6	18,3	18,9	33,3	CID
	P6-F7	3 a 3,6	17,5	5,7	35,7	CIU
	P7-F7	13 a 13,6	17,6	14,1	36,5	CIU
	P3-F5	3 a 3,6	20,1	1,9	38,1	CIU
	P4-F8	6 a 6,6	18,7	3,3	39,2	CIU
MÉDIA	-	-	19,0	7,6	33,4	-
DESV. PAD.	-	-	1,0	6,0	4,3	-

Nota: 1) Os ensaios triaxiais indicados não foram considerados no cálculo da média e desvio padrão, pois apresentaram valores de coesão elevados e ângulos de atrito reduzidos em relação aos demais ensaios, o que pode indicar algum erro no ensaio.

Como pode ser observado na Tabela 7.14, os parâmetros de resistência efetivos obtidos ao utilizar a Campanha da FUGRO (2021) são mais elevados, indicando que os parâmetros adotados anteriormente são mais conservadores. Esse é um fato esperado, pois no passado os parâmetros da fundação foram interpretados por correlação empíricas através de valores de NSPT, obtidos ao longo de anos de investigação de campo. É comum a utilização de parâmetros mais conservadores ao se utilizar essas correlações pois são parâmetros obtidas através de medidas “indiretas” com uso de equações empíricas, naturalmente com maiores incertezas. Atualmente, comparando esses resultados com medições de laboratório, constata-se que fundação possui

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS1		

resistência um pouco melhor do que os valores utilizados no passado, o que é um ponto positivo.

7.3.2 Resíduo Filtro Prensa

Para a avaliação dos parâmetros de resistência efetivos do Resíduo do Filtro Prensa, foram analisados os ensaios triaxiais tipo CIU_{SAT} realizados no Aterro Experimental do DRS1 na campanha de investigação realizadas pela GEOMECÂNICA em 2016. Os dados do ensaio foram obtidos no Relatório Técnico de Consolidação dos Ensaios de Laboratório do Aterro Experimental do DRS1, emitido pela LPS em 19/07/2017, porém os parâmetros de resistência foram obtidos a partir da interpretação da FONNTES.

Os parâmetros de resistência obtidos para o Resíduo do Filtro Prensa em cada ensaio se encontram resumidos na Tabela 7.15. Além dos parâmetros de resistência efetivos obtidos nos ensaios triaxiais de cada amostra, apresenta-se também a média e o desvio padrão.

Tabela 7.15 – Avaliação Estatística dos Ensaios Triaxiais do Resíduo da Zona Estrutural do DRS2.

CAMPANHA	AMOSTRA	ENSAIO	PESO ESP. γ (kN/m ³)	COESÃO C (kPa)	ÂNGULO DE ATRITO ϕ (°)
GEOMECÂNICA (2015)	Bloco 1	CIUsat	20,22	0	37,5
	Bloco 2	CIUsat	17,65	13	33,2
	Bloco 7	CIUsat	19,02	20,5	25,5
	Bloco 8	CIUsat	20,12	0	34,9
	Bloco 11	CID	20,62	4,7	38,5
	Bloco 12	CID	20,52	4,2	36,4
MÉDIA	-	-	19,69	7,1	34,3
DESV. PAD.	-	-	1,05	7,41	4,31

Para a definição dos parâmetros de resistência, a PIMENTA DE AVILA realizou a análise conjunta dos ensaios triaxiais tipo CIU_{SAT} executados no Resíduo do Filtro Prensa, traçando-se um único gráfico $p' \times q$, indicado na Figura 7.3.

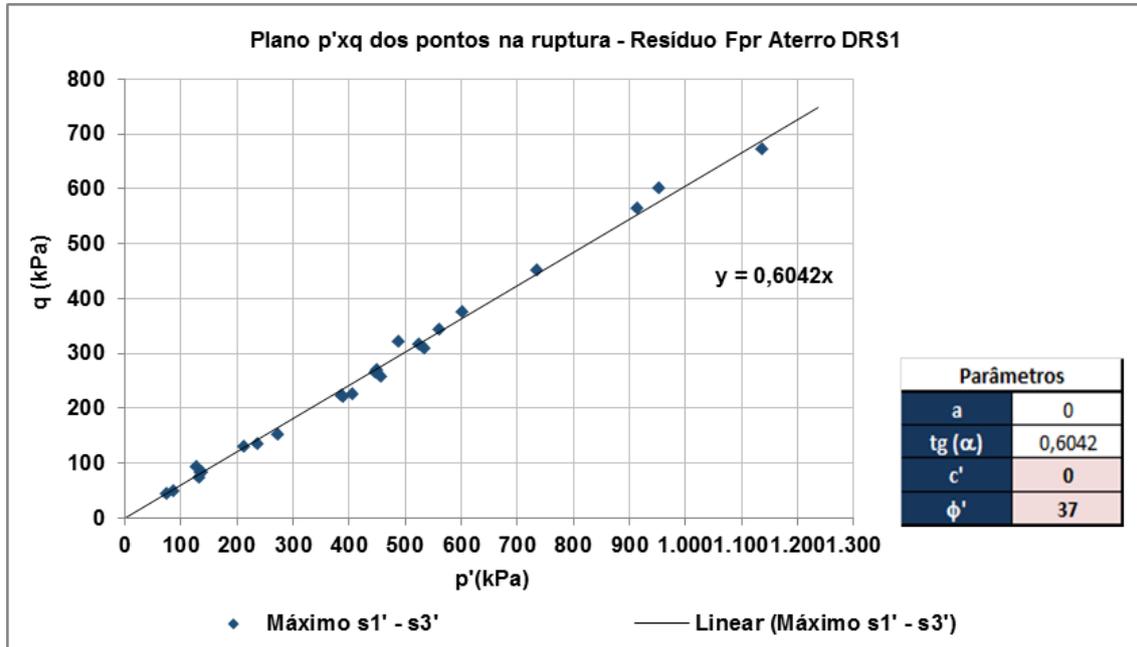
AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS1


Figura 7.3 – Parâmetros de resistência efetivos do resíduo de filtro prensa proveniente do aterro teste realizado no DRS1 – Ensaio triaxiais CIUsat – Critério de máxima tensão desviadora (PIMENTA DE ÁVILA, 2018).

Observa-se que houve uma diferença razoável entre os parâmetros de resistência do Resíduo do Filtro Tambor adotados pela PIMENTA DE ÁVILA em 2018 ($c'=0$ kPa e $\phi'=37^\circ$) e os parâmetros de resistência obtidos na Tabela 7.13 ($c'=7$ kPa e $\phi'=34^\circ$). Essa diferença é decorrente da metodologia de análise, cuja envoltória final foi interpretada de forma conjunta com todo os corpos de prova ensaiados, o que reduz a influência devido a repetibilidade ou erros em algum dos ensaios individuais.

De modo a validar a análise da PIMENTA DE ÁVILA (2018), a FONNTES realizou a interpretação conjunta dos ensaios triaxiais executados pela GEOMECÂNICA em 2016. Como se pode observar na Figura 7.4, a análise conjunta da FONNTES forneceu resultados similares aos obtidos pela PIMENTA DE ÁVILA em 2018, na Figura 7.3.

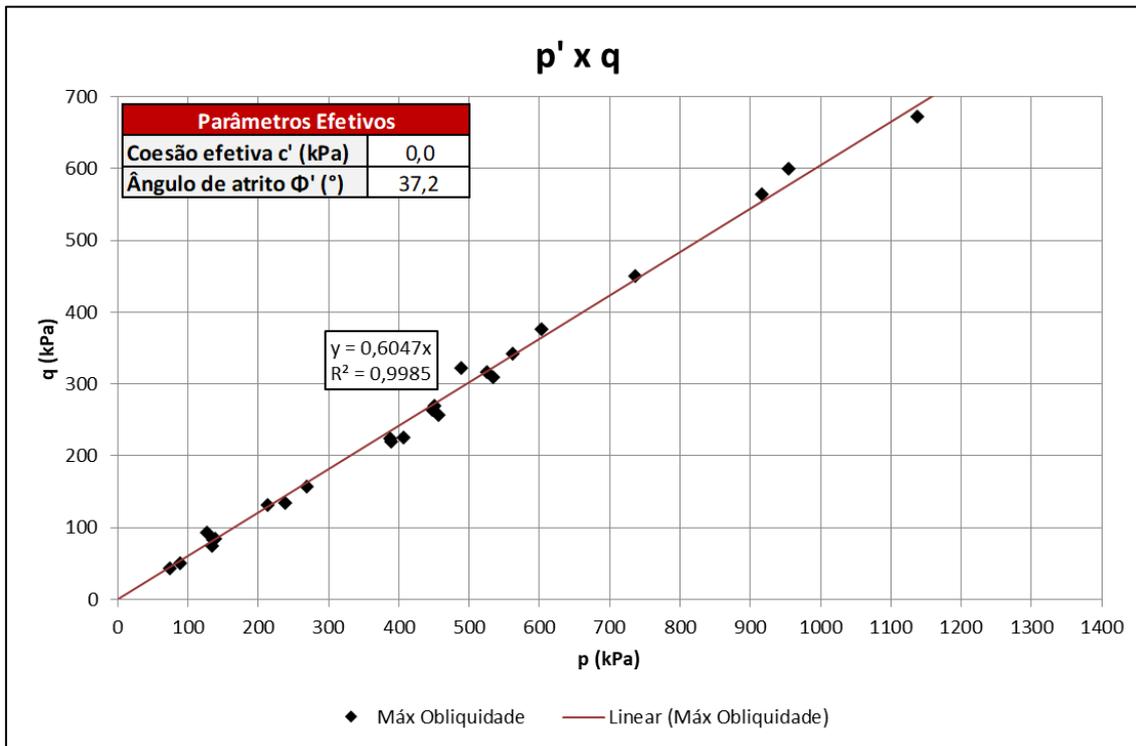
AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS1


Figura 7.4 – Determinação dos parâmetros de resistência efetivos do filtro prensa, a partir da avaliação conjunta dos ensaios triaxiais CIUSat executados pela GEOMECÂNICA em 2016

7.3.3 Resíduo Filtro Tambor

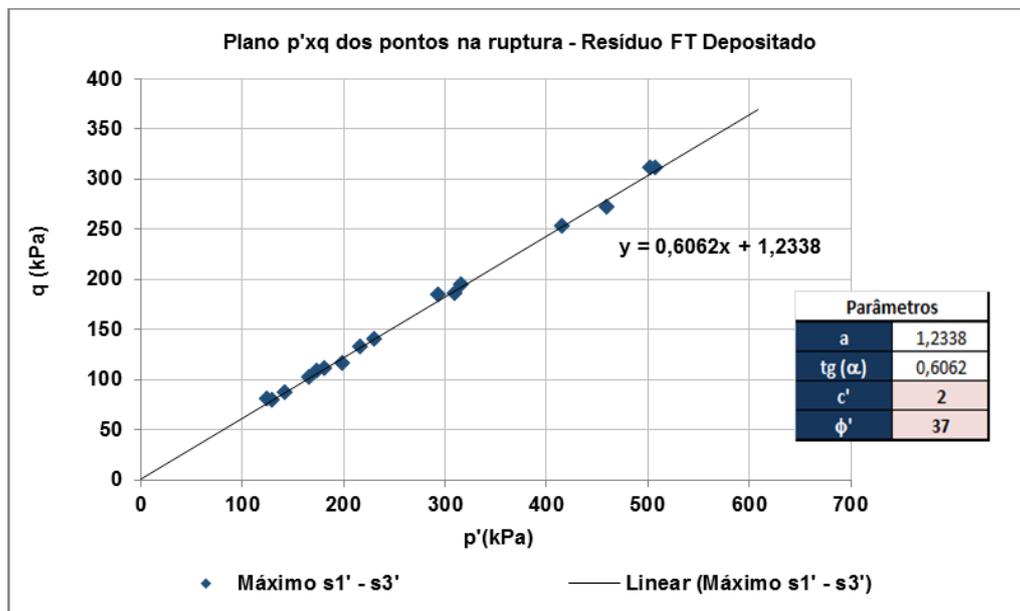
Para a avaliação dos parâmetros de resistência efetivos do Resíduo do Filtro Tambor, foram analisados os ensaios triaxiais tipo CIUSAT realizados no material na campanha de investigação realizadas pela GEFORMA em 2017. Os dados do ensaio foram obtidos nos boletins dos ensaios da GEFORMA, disponibilizados pela HYDRO em 07/02/22.

Os parâmetros de resistência obtidos em cada ensaio triaxial CIUSAT realizado no Resíduo do Filtro Tambor, a partir da interpretação da FONNTES, se encontram resumidos na Tabela 7.16. Além dos parâmetros de resistência efetivos obtidos nos ensaios triaxiais de cada amostra, apresenta-se também a média e o desvio padrão.

AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS1
Tabela 7.16 – Parâmetros de resistência do resíduo filtro tambor obtidos na campanha GEOFORMA (2017)

CAMPANHA	AMOSTRA	PROF. (m)	PESO ESP. γ (kN/m ³)	COESÃO c (kPa)	ÂNGULO DE ATRITO ϕ (°)	ENSAIO
GEOFORMA 2017	SH-17	3,60 - 4,20	18,09	11,4	33,1	CIU
	SH-21	3,00 - 3,60	18,52	2	37	CIU
	SH-23	3,00 - 3,60	18,25	29,3	27,6	CIU
	SH-28	3,00 - 3,60	18,49	0	38,2	CIU
MÉDIA	-	-	18,3	10,7	34,0	-
DESV. PAD.	-	-	0,2	11,6	4,1	-

Para a definição dos parâmetros de resistência, a PIMENTA DE AVILA realizou a análise conjunta dos ensaios triaxiais tipo CIU_{SAT} executados pela GEOFORMA em 2017 no Resíduo do Filtro Tambor, traçando-se um único gráfico $p' \times q$, indicado na Figura 7.5.


Figura 7.5 – Parâmetros de resistência efetivos do resíduo de filtro tambor depositado no DRS1 – Ensaios triaxiais CIU – Critério de máxima tensão desviadora (PIMENTA DE AVILA, 2018).

Observa-se que os parâmetros de resistência efetivos do resíduo do filtro tambor adotados pela PIMENTA DE AVILA (2018) apresentam um valor inferior de coesão e um valor superior de ângulo de atrito em relação à média dos parâmetros de resistência obtidos individualmente pela FONNTES na Tabela 7.16.

AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS1

A FONNTES realizou a interpretação conjunta dos ensaios triaxiais executados pela GEOFORMA em 2017, ou seja, um envoltória de resistência verificada de forma conjunta com todos os corpos de prova ensaios, o que reduz a influência devido a repetibilidade ou possíveis erros individuais. Como se pode observar na Figura 7.6, a análise conjunta da FONNTES forneceu resultados mais conservadores (ou seja, parâmetros menores, especialmente ângulo de atrito) que os obtidos pela PIMENTA DE AVILA em 2018, na Figura 7.3. No entanto, foram obtidos parâmetros de resistência efetivos similares aos alcançados individualmente pela FONNTES na Tabela 7.16.

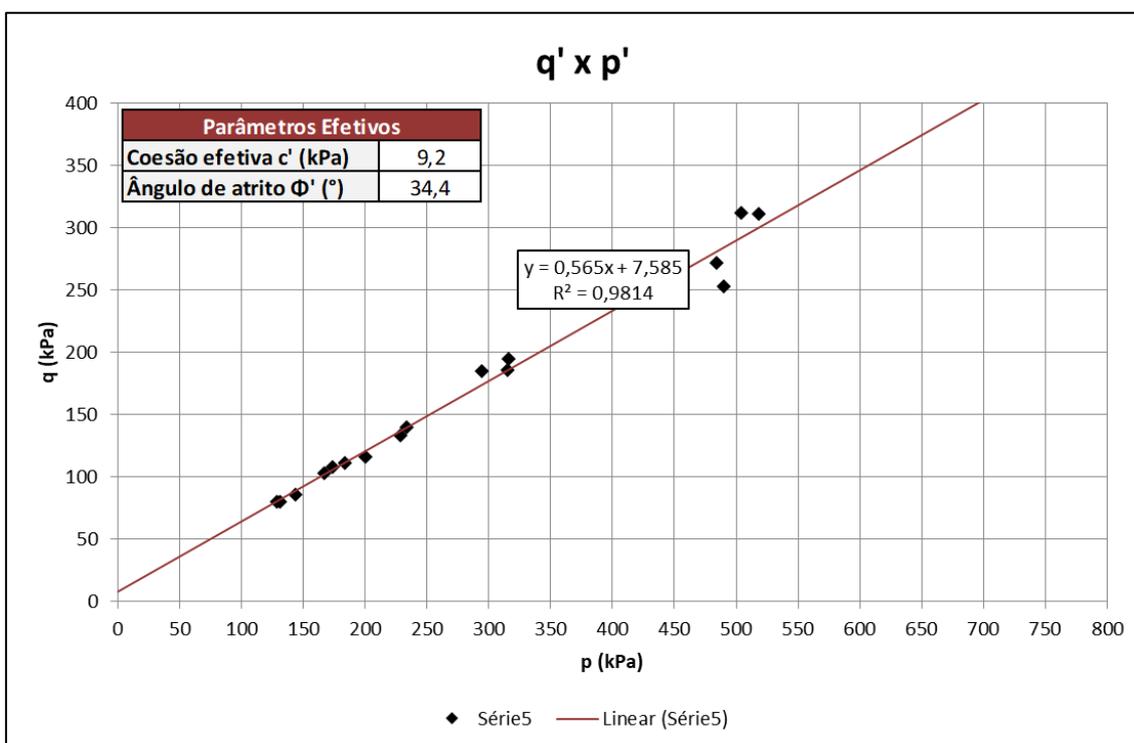


Figura 7.6 – Determinação dos parâmetros de resistência efetivos do resíduo do filtro tambor, a partir da avaliação conjunta dos ensaios triaxiais CIUSat executados pela GEOFORMA em 2017

No ano de 2019, foi realizada uma campanha de investigação geológico-geotécnica no resíduo filtro tambor do DRS1. Conforme indicado no Relatório de Ensaio Geotécnicos de Laboratório, emitido pela FUGRO em 10/10/19, doc. HYD005-LAB-02, a campanha contou a execução de dois ensaios triaxiais tipo CIUSAT.

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS1		

A FONNTES apresenta, na Tabela 7.17, o compilado dos ensaios triaxiais CIU_{SAT} realizados pela FUGRO em 2019. Foi disponibilizada à interpretação dos ensaios executados pela FUGRO, para os resultados dos ensaios CIU_{SAT} obtidos na ruptura dos corpos de prova, cujos parâmetros de resistência das amostras do resíduo filtro tambor foram obtidos.

Tabela 7.17 – Parâmetros de resistência do resíduo filtro tambor obtidos na campanha FUGRO (2019)

CAMPANHA	AMOSTRA	PROF. (m)	PESO ESP. γ (kN/m ³)	COESÃO c (kPa)	ÂNGULO DE ATRITO ϕ (°)	ENSAIO
FUGRO 2019	P7A F1	8,70 - 9,30	18,225	0	39,5	CIU
	P13A F1	5,70 - 6,30	17,8	1,3	41	CIU
MÉDIA	-	-	18,0	0,7	40,25	-
DESV. PAD.	-	-	0,21	0,7	0,8	-

Como pode ser observado na Tabela 7.17, os parâmetros de resistência efetivos obtidos ao utilizar a Campanha da FUGRO (2021) são mais elevados, indicando que os parâmetros adotados anteriormente são mais conservadores.

O doc. 3540-54-G-1014 R02, relativo ao Projeto As Is da PIMENTA DE AVILA (2021), também define parâmetros de resistência não drenados para o resíduo do filtro tambor, a serem utilizados nas análises de estabilidade na condição não drenada. A PIMENTA DE AVILA avaliou ensaios CPTu, Vane Test e ensaios de laboratório para estimar os parâmetros do material, sendo abordadas 3 regiões de forma distintas. Os gráficos elaborados pela PIMENTA DE AVILA são apresentados na Figura 7.7 a Figura 7.9. Vale lembrar que os mencionados ensaios são representativos do resíduo de filtro tambor em sua condição à época que foram ensaiados.

AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS1

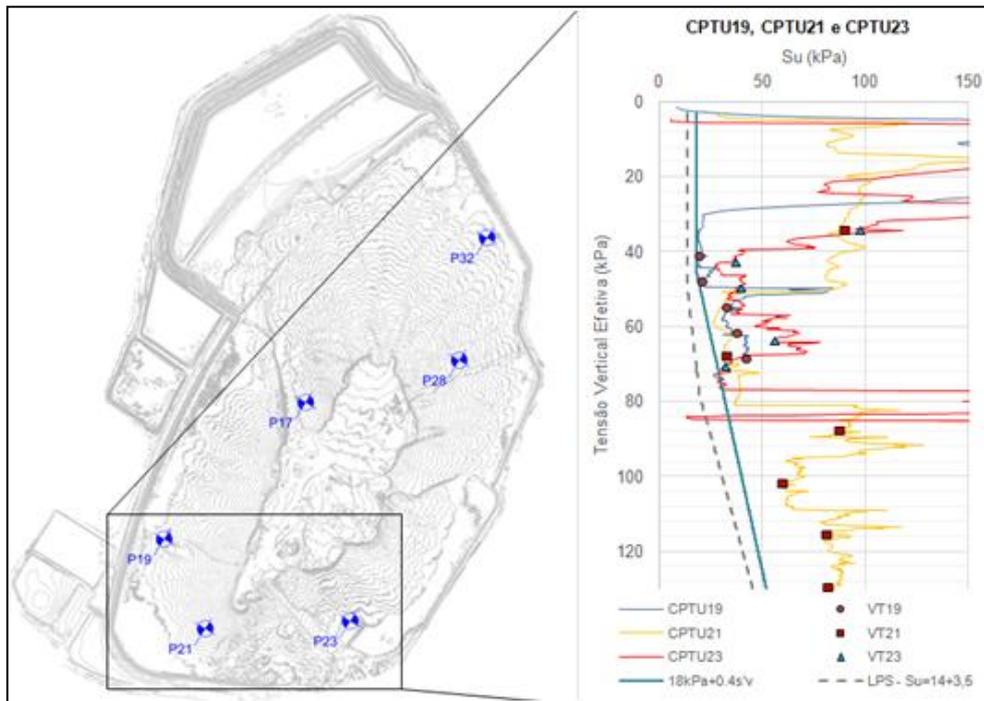


Figura 7.7 – Resistência não-drenada (resíduo de filtro tambor) – Região Sul – $18 \text{ kPa} + 0,4\sigma'_v$ (PIMENTA DE AVILA, 2021)

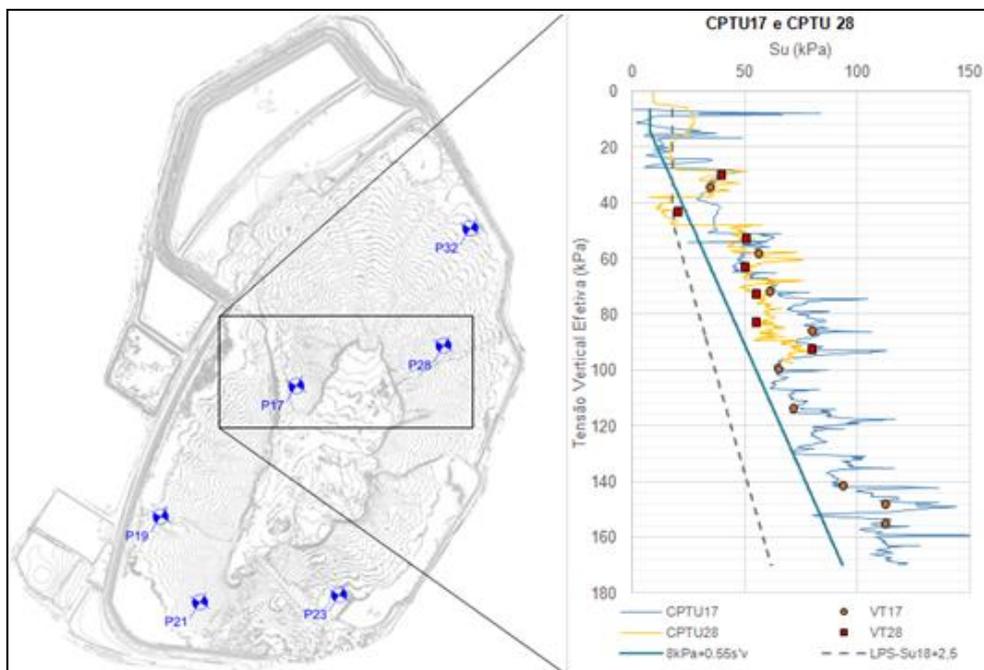


Figura 7.8 – Resistência não-drenada (resíduo de filtro tambor) – Região Central – $8 \text{ kPa} + 0,55\sigma'_v$ (PIMENTA DE AVILA, 2021)

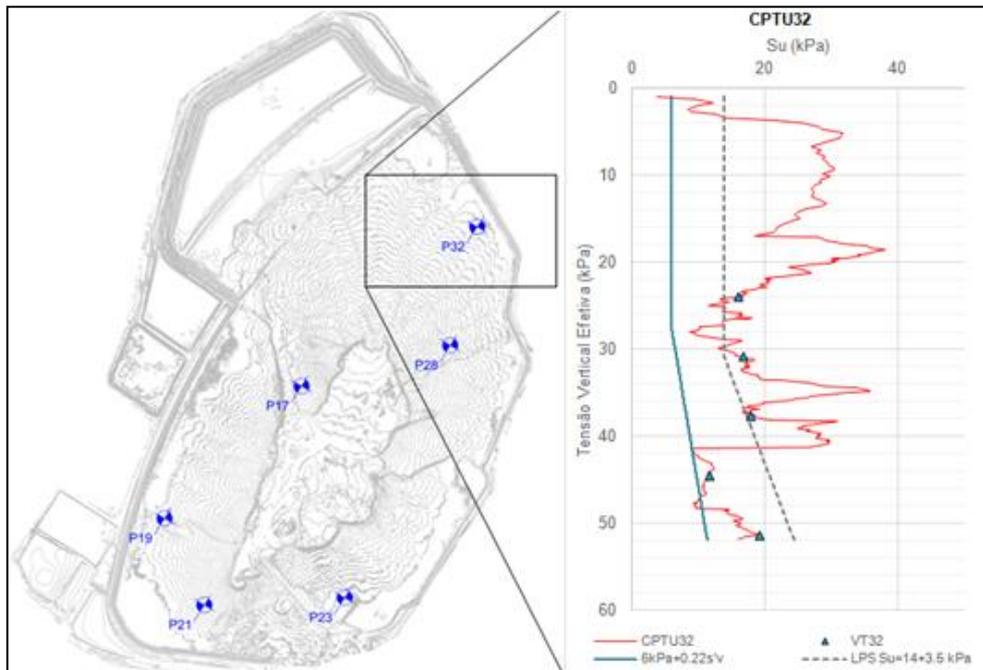


Figura 7.9 – Resistência não-drenada (resíduo de filtro tambor) – Região Norte – $6 \text{ kPa} + 0,22\sigma'_v$ (PIMENTA DE AVILA, 2021)

7.3.4 Aterro Compactado

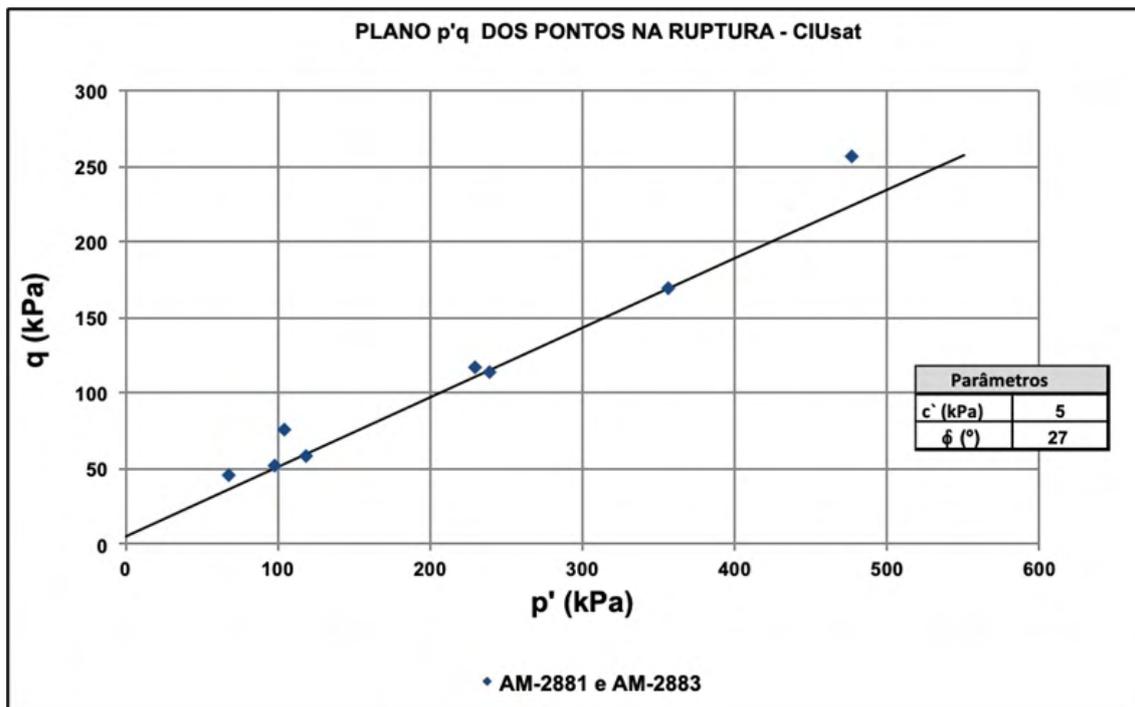
Para a avaliação dos parâmetros de resistência efetivos do aterro compactado, foram analisados os ensaios triaxial tipo CIU_{SAT} da campanha de investigação realizada pela GEOLABOR em 2003, indicada no Relatório de Ensaio Geotécnicos de Laboratório emitido pela GEOLABOR em julho/2003, doc. TLF- 2881/03. Os dados do ensaio foram obtidos nos boletins dos ensaios da GEOLABOR, disponibilizados pela HYDRO em 07/02/22.

Os parâmetros de resistência obtidos em cada ensaio triaxial CIU_{SAT} realizado no Aterro Compactado, a partir da interpretação da FONNTES, se encontram resumidos na Tabela 7.16. Além dos parâmetros de resistência efetivos obtidos nos ensaios triaxiais de cada amostra, apresenta-se também a média e o desvio padrão.

AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS1
Tabela 7.18 – Avaliação Estatística dos Ensaios Triaxiais do Aterro Compactado do DRS1.

CAMPANHA	AMOSTRA	PESO ESP. γ (kN/m ³)	COESÃO c (kPa)	ÂNGULO DE ATRITO ϕ (°)	ENSAIO
GEOLABOR 2003	2881	2,107	0	41,3	CIU
	2883	1,764	0	31,7	CIU
	2884	1,753	37,3	16,3	CIU
MÉDIA	-	1,9	12,4	29,8	-
DESV. PAD.	-	0,16	17,6	10,3	-

Para a definição dos parâmetros de resistência, a PIMENTA DE AVILA realizou a análises conjunta dos ensaios triaxiais CIU_{SAT} executados pela GEOLABOR em 2003 no aterro compactado, traçando-se um único gráfico p' x q para o material, indicado na Figura 7.10.


Figura 7.10 – Parâmetros de resistência efetivos do aterro compacto – Ensaios triaxiais CU_{SAT} (PIMENTA DE AVILA, 2021).

Observa-se que houve uma diferença considerável entre os parâmetros de resistência do aterro compactado adotados pela PIMENTA DE AVILA em 2021 ($c'=5$ kPa e $\phi'=27^\circ$) e os parâmetros de resistência obtidos na Tabela 7.13 ($c'=12$ kPa e $\phi'=30^\circ$). Portanto,

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS1		

verifica-se que nas análises de estabilidade da PIMENTA DE AVILA foram utilizados parâmetros de resistência drenada mais baixos e, portanto, mais conservadores.

De modo a realizar uma verificação similar a análise realizada pela PIMENTA DE AVILA (2021), a FONNTES realizou a interpretação conjunta dos ensaios triaxiais executados pela GEOLABOR em 2003. Como se pode observar na Figura 7.11, a análise conjunta da FONNTES forneceu resultados diferentes dos obtidos pela PIMENTA DE AVILA (2021). Os resultados diferentes são justificados pelo fato de os pontos ($p'xq$) encontrados pela PIMENTA DE AVILA (2021), Figura 7.10, divergirem dos encontrados pela interpretação da FONNTES, Figura 7.11, essa divergência pode estar correlacionada com a adoção de metodologias de análises diferentes para os ensaios triaxiais, por exemplo máxima obliquidade ou desviatória. Cabe destacar que os parâmetros calculados pela PIMENTA DE AVILA foram menores, e por conseguinte, mais conservadores, em relação àqueles calculados pela FONNTES.

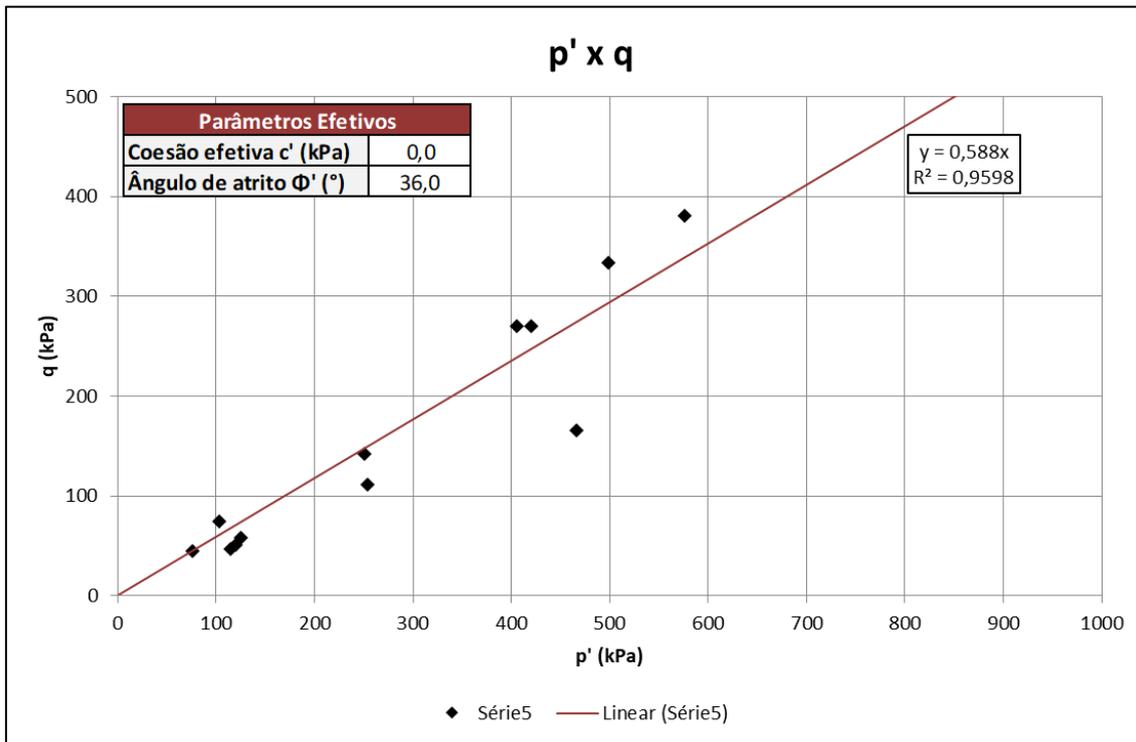
AVALIAÇÃO DOS PARÂMÊTROS GEOTÉCNICOS DO DRS1


Figura 7.11 – Determinação dos parâmetros de resistência efetivos do Aterro Compactado, a partir da avaliação conjunta dos ensaios triaxiais CIUSat executados pela GEOLABOR em 2003

8. CONCLUSÕES

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

No geral, os valores médios calculados são maiores que aqueles adotados em projeto, o que pode indicar que o projeto foi conservador. Entretanto, é importante lembrar que no projeto não foi necessariamente calculado um parâmetro médio em termos aritméticos, mas verificado um melhor ajuste para uma envoltória de ruptura considerando os pontos de máxima obliquidade das trajetórias de rupturas dos corpos

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO DRS1		

de prova 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.

Avaliação similar a realizada pela projetista também foi elaborada no âmbito desse estudo e resultados semelhantes foram obtidos. Portanto, não foram encontradas divergências entre os parâmetros adotados e os ensaios. Alguns ensaios elaborados pela FUGRO (2021) foram desconsiderados no estudo por terem apresentado parâmetros muito diferentes, possivelmente devido a erro no ensaio. Esse problema foi pontual e não comprometeu a análise realizada nessa campanha como um todo.

Portanto, a revisão dos parâmetros de resistência dos materiais, utilizando método similares àqueles verificados pelos projetistas e empresas auditoras, que são os mais adequados e largamente utilizados nesses tipos de estudo, não indicaram divergências ou erros nos estudos paramétricos dos materiais que pudesse resultar em qualquer mudança significativa no conhecimento atual da estrutura. Pelo contrário, os resultados obtidos pela FONNTES indicam que os parâmetros que têm sido utilizados estão a favor da segurança.

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.

AVALIAÇÃO DOS PARAMÊTROS GEOTÉCNICOS DO DRS1

- 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](#)>
- 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

TELEFONES

(31) 3582-9185

(31) 3582-9186

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