

FG-2201-NHB-A-BA-RT25-02

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 análise de estabilidade dos depósitos, em atendimento às letras “i” e “j” do Termo de Compromisso de Ajustamento de Conduta, celebrado entre a HYDRO 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 DRS1 está localizado junto a produção da Alunorte, no município de Barcarena – PA.

À disposição para esclarecimentos julgados necessários,

Belo Horizonte, 03 de agosto de 2023

Atenciosamente,



Michel Fontes
DIRETOR
FONNTES GEOTÉCNICA

RELATÓRIO TÉCNICO DE ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO DRS1

CLIENTE:



PROJETO:

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

BARCARENA - PA



		AUDITORIA DE SEGURANÇA
ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO DRS1		

REV.	DATA	POR	REVISÃO	APROV.	DESCRIÇÃO DE REVISÕES
0	29/06/22	BSC/RCM /RCJ	ACS/ BCN/ MVS	ACS	EMIÇÃO INICIAL
1	14/04/23	BSC/RCM /RCJ	ACS/ BCN/ MVS	ACS	ATENDIMENTO A COMENTÁRIOS
2	03/08/23	BSC/RCM /RCJ	ACS/ BCN/ MVS	ACS	APROVADO

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

TE – TIPO DE EMISSÃO

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

ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO DRS1**SUMÁRIO**

GLOSSÁRIO	1
1. INTRODUÇÃO	3
2. OBJETIVO	6
3. DADOS UTILIZADOS	8
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 PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA	29
7.2 ESTUDOS SÍSMICOS	33
7.3 ANÁLISES DE ESTABILIDADE	41
7.3.1 <i>Critérios Adotados</i>	42
7.3.2 <i>Seções de Análise</i>	44
7.3.3 <i>Verificação geométrica</i>	45
7.3.4 <i>Resultados</i>	47
7.3.5 <i>Comparação dos Fatores de Segurança Encontrados</i>	67
7.3.6 <i>Comparação dos Fatores de Segurança Calculados com as Recomendações Normativas</i> .69	
8. CONCLUSÕES	72
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74

ANÁLISE DE ESTABILIDADE 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
ANÁLISE DE ESTABILIDADE 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.

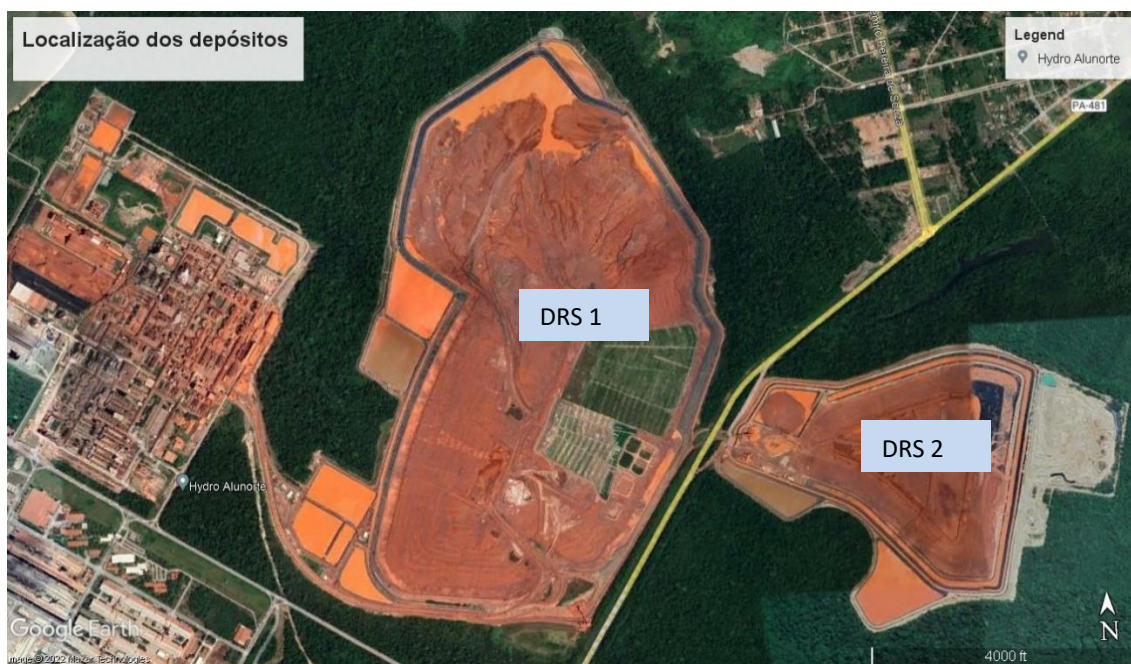


Figura 1.1 – Localização do empreendimento

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
ANÁLISE DE ESTABILIDADE 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

ANÁLISE DE ESTABILIDADE 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

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
ANÁLISE DE ESTABILIDADE 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 dos itens:

- 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; e
- 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

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 os itens:

- 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; e

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO DRS1		

- 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

Ao se iniciar os serviços foram realizadas reuniões com o MPPA para alinhamento do escopo das letras do TAC 3.1. Essas reuniões ensejaram no envio de um ofício elaborado pela FONNTES com esclarecimentos do entendimento técnico das perguntas para adequado encadeamento das atividades. Posteriormente foi recebido o “de acordo” do MPPA para elaboração dos serviços seguindo o raciocínio apresentado no ofício, que passou a ser utilizado como referência para elaboração de todos os relatórios. Vale destacar que esse esclarecimento foi muito importante para o direcionamento dos serviços, porque em alguns casos havia perguntas com temas que teriam melhor abordagem em outras letras do TAC 3.1 ou ainda em outras cláusulas que não eram escopo do presente trabalho. Abaixo é reproduzido o extrato do ofício com a explicação do entendimento para resposta da pergunta **letra I) e J)**, objeto desse relatório.

- i) *Esse item exige a realização de uma reavaliação dos modelos matemáticos elaborados para se calcular os fatores de segurança da estrutura. iremos refazer os modelos matemáticos, para as seções de controle que são tradicionalmente utilizadas para essa verificação das estruturas. No item é proposto que se utilize o software Slope/W da fabricante Geostudio, contudo será utilizado o software Slide2 da fabricante Rocscience, sendo este um software de mercado tão utilizado quando o Slope/W, cujos resultados são os mesmos.*
- Em nossa avaliação o termo “estanqueidade” na pergunta diz respeito a geomembrana de PEAD, utilizada para impermeabilização das estruturas. Esse tema será abordado em maiores detalhes no Item O).*

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO DRS1		

- J) Esse item será abordado em detalhes no Item A) e Item I). No item A) será realizada a avaliação e comparação dos fatores de segurança com as normas mencionadas a partir de estudos de estabilidade já conduzidos por outros auditores. No item I) os modelos matemáticos de cálculo dos fatores de segurança serão reinterpretados pela FONNTES. Como esse é um tema que já será abordado em outros itens, será apresentado um resumo dos resultados, com foco apenas na comparação dos resultados em relação as recomendações normativas.*

3. DADOS UTILIZADOS

Os documentos utilizados como referência para obtenção de dados e informações necessárias à elaboração deste documento são apresentados na Tabela 3.1.

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
ANÁLISE DE ESTABILIDADE 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
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
FG-2201-NHB-A-BA-RT19	Relatório Técnico de Avaliação dos Parâmetros Geotécnicos do DRS1	FOONTES	06/06/2022
RT-8400-54-G-059-rev1	Relatório Técnico Consolidação das Investigações Geotécnicas	LPS	14/09/2017
RT-8400-54-G-155-rev3	Relatório Técnico Cartas de Controle do DRS1	LPS	23/06/2020
RT-469137-54-G-0003-rev02	Relatório da Inspeção de Segurança Regular do DRS1	GEOCONSULTORIA	22/06/2022
RT-8400-54-G-019-R1	Estudos de Avaliação de Ameaça Sísmica nos Sítios da HYDRO Paragominas e HYDRO Alunorte	HYDRO	20/10/2017
D1-8600-54-L-2316-R0	Base Topográfica Atualizada - Curvas de Nível a cada 1,00m, geradas através do lev. a laser scanner - Janeiro de 2022	GONÇALVES TOPOGRAFIA	14/01/2022

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,

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO DRS1		

geologia e fisiografia do projeto da estrutura em avaliação. Este conteúdo introdutório comum a todos os relatórios de cada letra específica do Termo de Ajustamento de Conduta (TAC) 3.1 contempla os itens 1 a 5.

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

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

5. APRESENTAÇÃO DA ESTRUTURA

Conforme indicado no Relatório Técnico do Projeto “As Is”, elaborado pela PIMENTA DE AVILA em 2021, doc. RT-3540-54-G-570-R01, o depósito DRS1 foi projetado para armazenar os resíduos industriais advindos do beneficiamento da bauxita. Até o ano de 2005, os resíduos industriais eram provenientes exclusivamente do beneficiamento da bauxita da Mineração Rio do Norte (MRN) e, posteriormente a esta data, iniciou-se o beneficiamento da bauxita proveniente da Mineração Bauxita Paragominas (MBP).

ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO DRS1

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

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

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

ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO DRS1

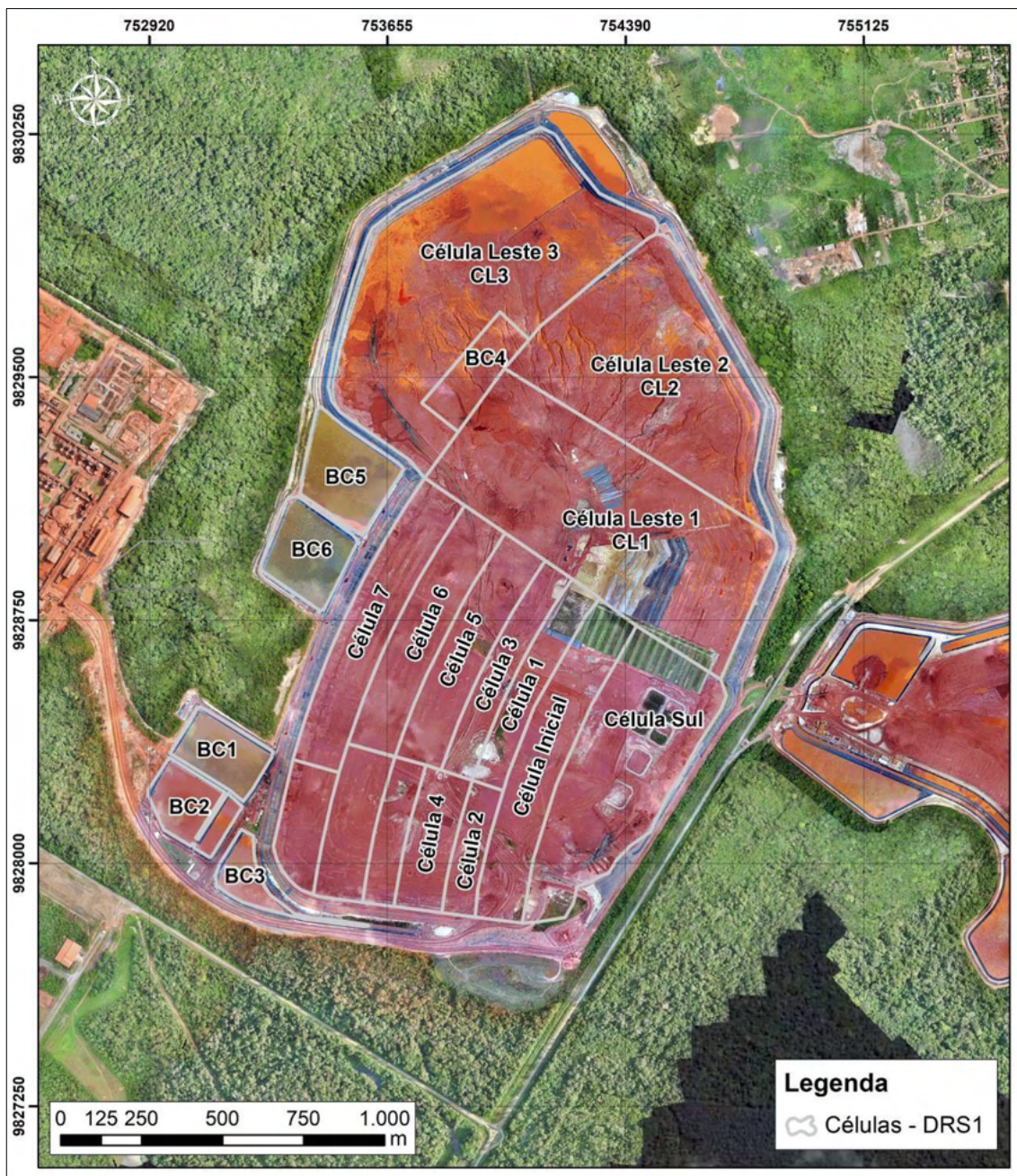


Figura 5.1 – Identificação das células e bacias de contribuição do DRS1 (PIMENTA DE AVILA, 2021).

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
ANÁLISE DE ESTABILIDADE 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 DRS1 e DRS2 e situa-se em torno das coordenadas UTM/DATUM SIRGAS 2000 754.812 E 9.828.482 S.

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

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

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

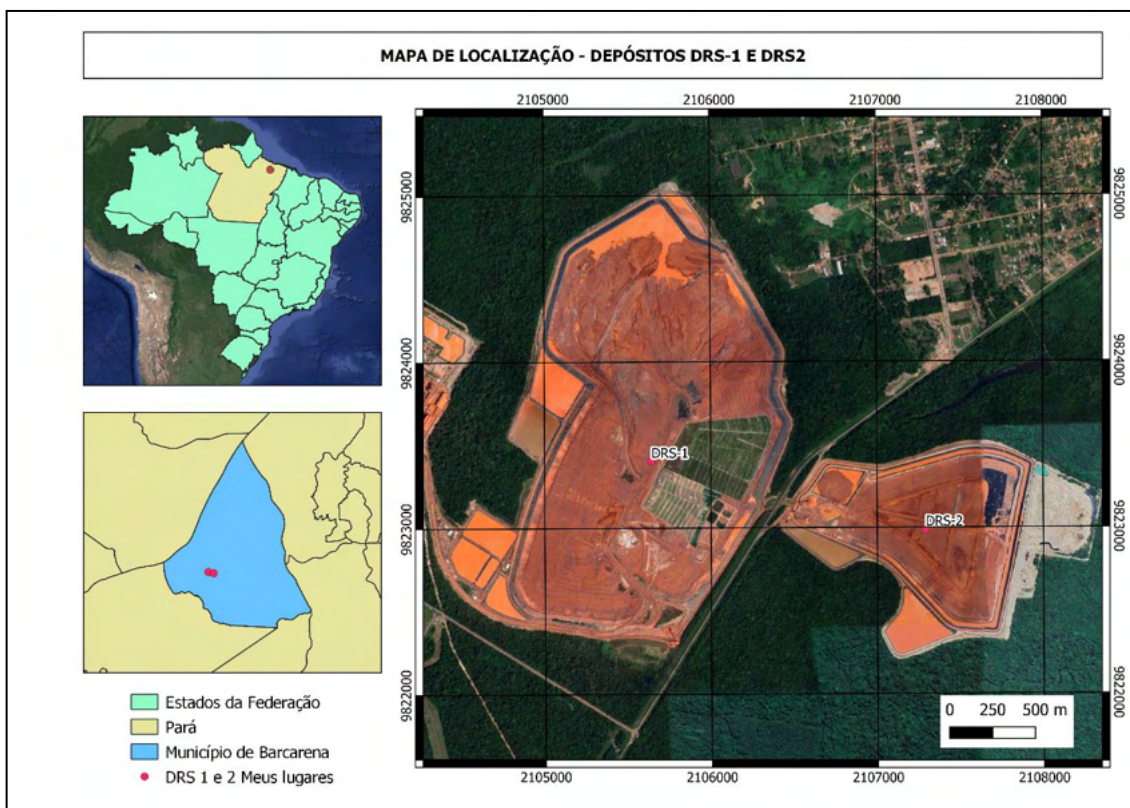
ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO DRS1


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
ANÁLISE DE ESTABILIDADE 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.

ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO DRS1



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

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
ANÁLISE DE ESTABILIDADE 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).

ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO DRS1

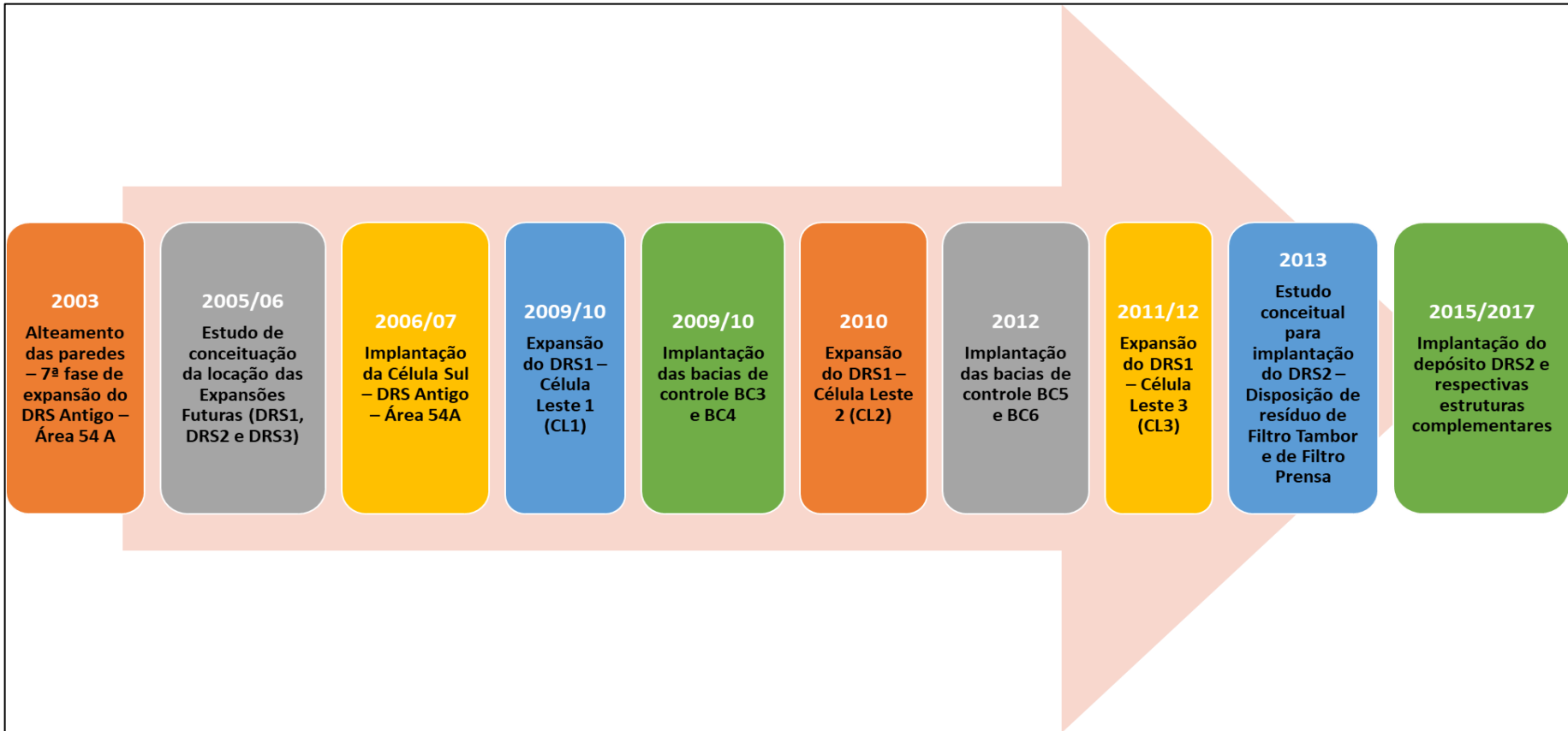


Figura 5.4 – Histórico de expansão do DRS1 e DRS2

5.2 ASPECTOS GEOLÓGICOS

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

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

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

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

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

ANÁLISE DE ESTABILIDADE 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.

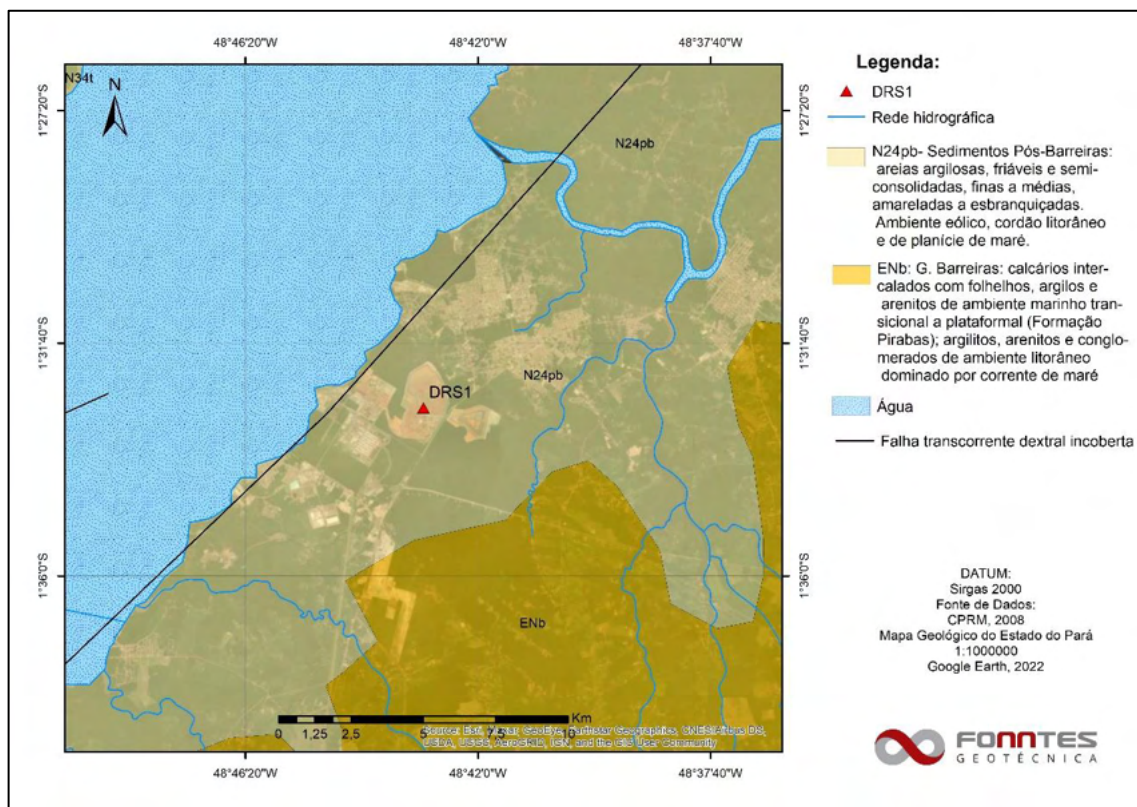


Figura 5.5 – Mapa geológico regional da estrutura DRS1

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
ANÁLISE DE ESTABILIDADE 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
ANÁLISE DE ESTABILIDADE 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.

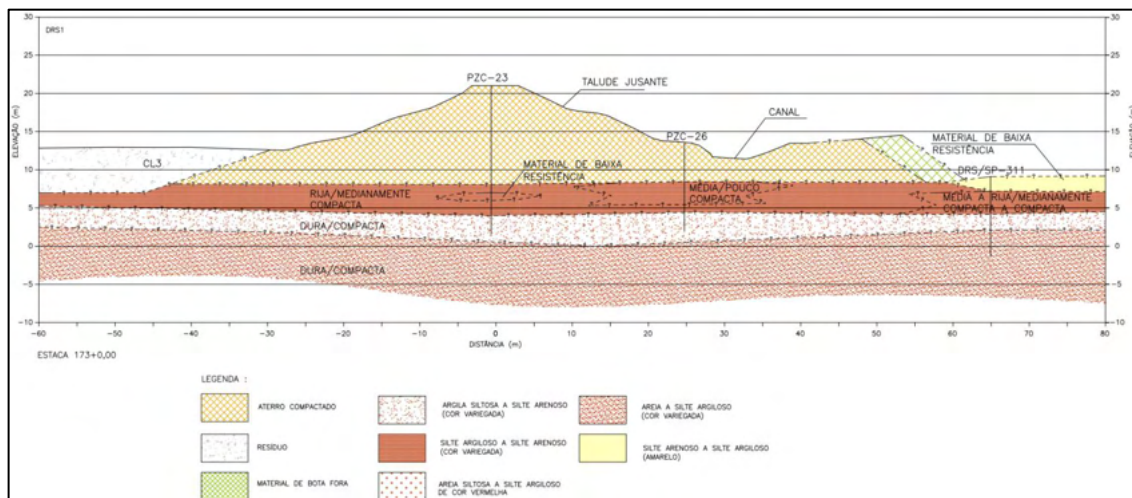
ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO DRS1


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
ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO DRS1		

Os canais de contorno circundam todo o depósito DRS1 e são divididos em canal norte, sul, leste e 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 filtro prensa densificado assente sobre perfil estabilizado da superfície do depósito;
- uma camada de areia ou geossintético drenante de bloqueio/ sistema de drenagem subsuperficial;

ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO DRS1

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

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

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.

ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO DRS1

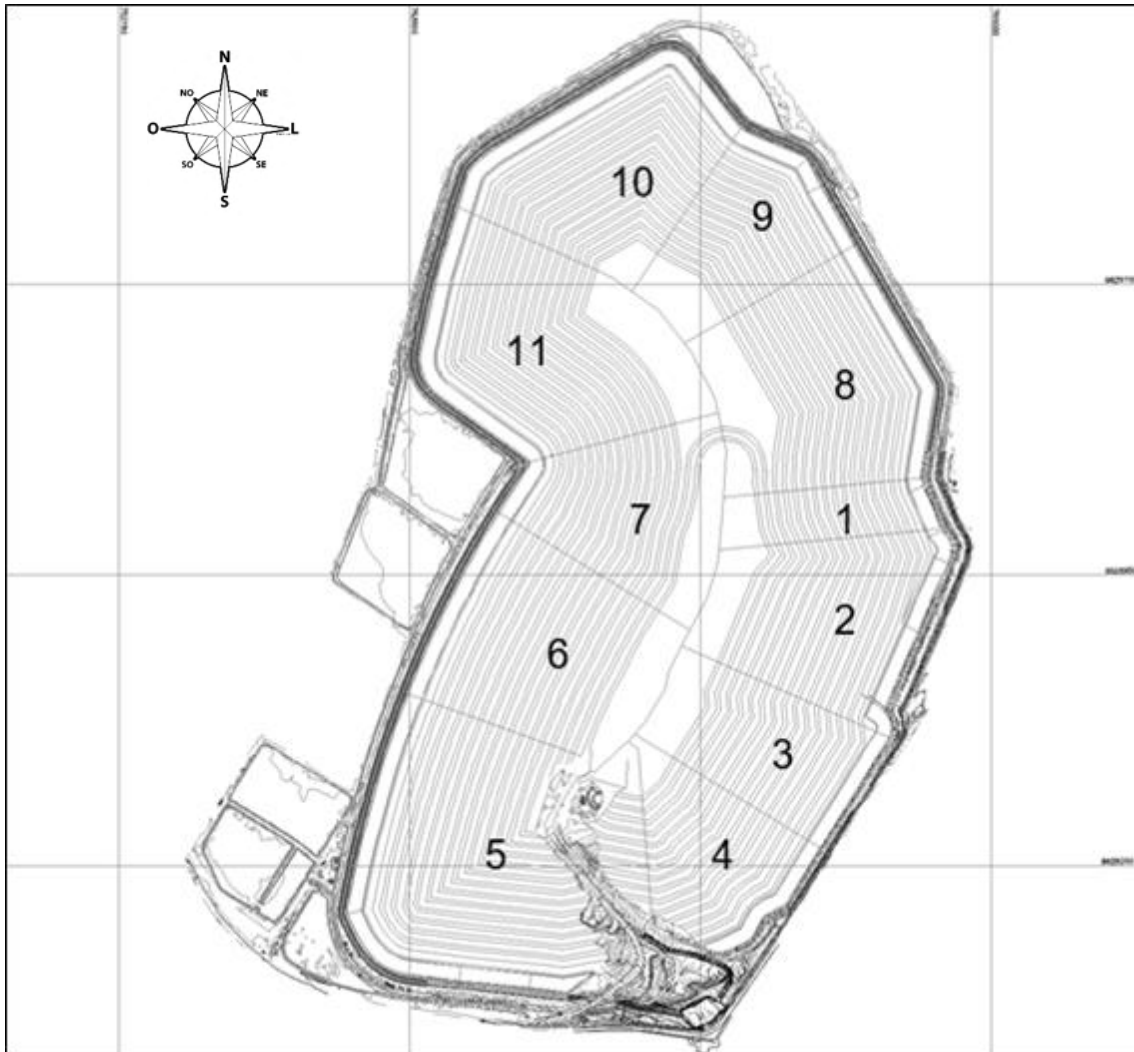


Figura 5.7 – Faixas de reabilitação do DRS1 (Doc. OM-8400-54-G-069 R01)

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
ANÁLISE DE ESTABILIDADE 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 i) e J)**, objeto desse relatório, e reproduzida a seguir.

Os estudos serão conduzidos considerando como referência as análises de estabilidade elaboradas no último relatório de auditoria técnica da estrutura. Inicialmente serão verificados os parâmetros de resistência ao cisalhamento adotado para os materiais, em conformidade com o banco de dados de ensaios e projeto anteriores. Posteriormente, será verificada a geometria das seções de análise, utilizada na auditoria técnica, e verificação de possíveis alteração na estrutura a partir de uma base topográfica atualizada. Caso seja verificada atualização topográfica, a seção de análise também será atualizada. Posteriormente, os modelos de análises serão recalculados pela FONNTES, e os resultados serão comparados com as referências normativas.

As análises de estabilidade serão realizadas a partir de uma reavaliação dos modelos matemáticos elaborados para se calcular os fatores de segurança da estrutura. Os modelos matemáticos serão refeitos, para as seções de controle que são tradicionalmente utilizadas para essa verificação das estruturas. O software proposto foi o Slope/W da fabricante Geostudio, contudo será utilizado o software Slide2 da fabricante Rocscience, sendo este um software de mercado tão utilizado quando o Slope/W, cujos resultados são os mesmos.

Em nossa avaliação o termo “estanqueidade” no item i) do Inquérito Civil - IC n° 001/2018 - MP (SIMP n°000654 -710/2018) MPPA, Inquérito Civil n° 000980 - 040/2018 (Portaria no 12/2018) MPPA, Inquérito Civil no 1.23.000.000498/2018

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO DRS1		

- 98 MPF, diz respeito a geomembrana de PEAD, utilizada para impermeabilização das estruturas. Esse tema é abordado em maiores detalhes no Item O), no documento FG-2201-NHB-A-BA-RT11.

Em relação a 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 13.029/2017, será realizada a avaliação e comparação dos fatores de segurança com as normas mencionadas a partir de estudos de estabilidade já conduzidos por outros auditores. Além disso, no âmbito do presente relatório será apresentado um resumo dos resultados das análises realizadas a partir dos modelos matemáticos de cálculo dos fatores de segurança reavaliados pela FONNTES.

7. DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO

7.1 PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA

A FONNTES realizou uma Avaliação dos Parâmetros Geotécnicos do DRS1 no documento FG-2201-NHB-A-BA-RT19. Neste relatório foi realizada a avaliação exclusivamente do banco de dados de ensaios de laboratório, que são as medidas diretas e mais confiáveis para a resistência dos materiais, coesão e ângulo de atrito efetivo. Através do banco de dados foi realizada uma verificação para as principais campanhas de ensaios e os resultados obtidos. Comparativamente, foi verificado para cada material quais são os parâmetros médios calculados pela FONNTES no documento FG-2201-NHB-A-BA-RT19 e aqueles adotados no Projeto As Is, elaborado pela PIMENTA DE ÁVILA em 29/07/2021, doc. RT-3540-54-G-1014 R02.

Avaliação similar a realizada pela projetista e apresentada no documento RT-3540-54-G-1014 R02 também foi elaborada no âmbito do documento FG-2201-NHB-A-BA-RT19

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO DRS1		

e resultados semelhantes foram obtidos. Portanto, não foram encontradas divergências entre os parâmetros adotados e os ensaios executados nos materiais das dependências do DRS1.

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 7.1 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 7.2 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 7.3 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.

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 7.4), com os adotados pela LPS e Pimenta de Ávila (Tabela 7.1, Tabela 7.2 e Tabela 7.3, respectivamente). Como resultado, foi verificado que os parâmetros adotados pela

ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO DRS1

GEOCONSULTORIA (2022), Tabela 7.4, estão de acordo com aqueles adotados pela LPS (2017), LPS (2020) e Pimenta de Ávila (2021).

Visto isso, os parâmetros geotécnicos de resistência ao cisalhamento na condição drenada e não drenada adotados nas análises de estabilidade desse estudo são aqueles apresentados na Tabela 7.4.

Tabela 7.1 – Parâmetros de Resistência adotados nas análises de estabilidade pela LPS, 2017, no Documento RT-8400-54-G-059-rev1, “Consolidação das Investigações Geotécnicas – Rejeito Filtro Tambor Depositado”.

MATERIAL	Su min (kPa)	ΔSu (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 7.2 – Consolidação das investigações geotécnicas, Documento RT-8400-54-G-155-rev3, Relatório Técnico Cartas de Controle do DRS1.

MATERIAL	γ (kN/m³)	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	-

ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO DRS1
Tabela 7.3 – 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. $\sigma'v$	-
Resíduo de Filtro Tambor Porção Norte	18,2	2	37	6+0,22. $\sigma'v$	-
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

ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO DRS1

Tabela 7.4 – 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)	6kPa (kPa)	Φ' (°)	Su min (kPa)	Su/ σ'	Δ Su (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)

7.2 ESTUDOS SÍSMICOS

A LPS Consultoria e Engenharia LTDA realizou um Estudos de Avaliação de Ameaça Sísmica nos Sítios da HYDRO Paragominas e HYDRO Alunorte, apresentados no

ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO DRS1

documento RT-8400-54-G-019-R1. Os estudos desenvolvidos tiveram como finalidade a apresentação da estimativa de ameaça sísmica nas instalações da HYDRO Paragominas e da HYDRO Alunorte (Barcarena), no Estado do Pará.

Em virtude do histórico de baixo nível de atividade sísmica no Brasil, em particular da região em questão, do intervalo de tempo pequeno de auscultação instrumental, da falta de precisão nas localizações epicentrais e do comportamento oscilatório da atividade sísmica, as premissas adotadas para desenvolvimento dos estudos apresentados no documento RT-8400-54-G-019-R1 foram:

- Estudo da sismicidade através de métodos probabilísticos, estimando a probabilidade de excedência de determinado parâmetro relacionado a movimentos sísmicos;
- Modelo de distribuição espacial difusa com fontes pontuais distribuídas em áreas sismogênicas;
- Presença de 2 modelos de áreas sismogênicas para o Brasil, determinadas com base no modelo de sismicidade intraplaca (área A) e em função da geologia estrutural (área B) para cálculo da aceleração horizontal de pico, na rocha;
- Obtenção da aceleração horizontal de projeto.

Conforme indicado no documento RT-8400-54-G-019-R1, o estudo de sismicidade em uma dada região consiste na análise probabilística da excedência de um determinado parâmetro inerente a ocorrências sísmicas, em um intervalo de tempo. Esta análise, que permite a obtenção da aceleração horizontal atuante no embasamento rochoso, engloba as seguintes etapas:

- Localizar as zonas potenciais de geração de sismos (zonas sismogênicas) e estimar as respectivas atividades;
- Determinar os parâmetros de sismicidade regional;
- Selecionar modelos para análise de sismicidade;
- Definir a lei de atenuação dos movimentos sísmicos;

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO DRS1		

- Calcular as probabilidades de excedência no local em estudo para o parâmetro de movimento solicitado, por meio de curva de ameaça sísmica.

Como etapa complementar dos Estudos de Avaliação de Ameaça Sísmica nos Sítios da HYDRO Paragominas e HYDRO Alunorte (documento RT-8400-54-G-019-R1), foi avaliada a resposta sísmica 1-D para os sítios HYDRO Alunorte e HYDRO MPSA, considerando sismos intraplaca ocorridos na região Leste dos Estados Unidos, com características geológicas semelhantes às da plataforma continental brasileira, em virtude da impossibilidade de obtenção dos registros sísmicos (acelerogramas) na região de estudo.

Da análise 1D da resposta sísmica e dos perfis estratigráficos das regiões em estudo, resultaram as acelerações horizontais de pico (PGA) considerando uma espessura de coluna de solo e aterro sobrejacente ao topo da camada de rocha sã, possibilitando a avaliação do coeficiente sísmico representativo da aceleração média no corpo do aterro.

Seguindo a metodologia apresentada, nos estudos apresentados no documento RT-8400-54-G-019-R1 foram obtidas acelerações máximas horizontais de pico na rocha, para o sítio de HYDRO Alunorte, para diferentes tempos de recorrência (TR), conforme Tabela 7.5.

ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO DRS1
Tabela 7.5 – Acelerações horizontais máximas no embasamento rochoso (LPS, 2017)

Sítio	Lei de atenuação	Aceleração horizontal máxima na rocha (g) para um dado TR				
		72	475	975	2.475	2.475
		anos	anos	anos	anos	anos
HYDRO-Alunorte	Toro (1997,2002)	0,008g	0,020g	0,026g	0,038g	0,065g

A seguir, são apresentados, sob a forma de aceleração horizontal de pico (PGA), os resultados da análise da resposta sísmica 1D obtidos pelos estudos apresentados no documento RT-8400-54-G-019-R1. A Figura 7.1 ilustra os resultados para o projeto HYDRO-Alunorte. Destes resultam os coeficientes sísmicos referentes às acelerações médias no corpo do aterro, apresentados na Tabela 7.6.

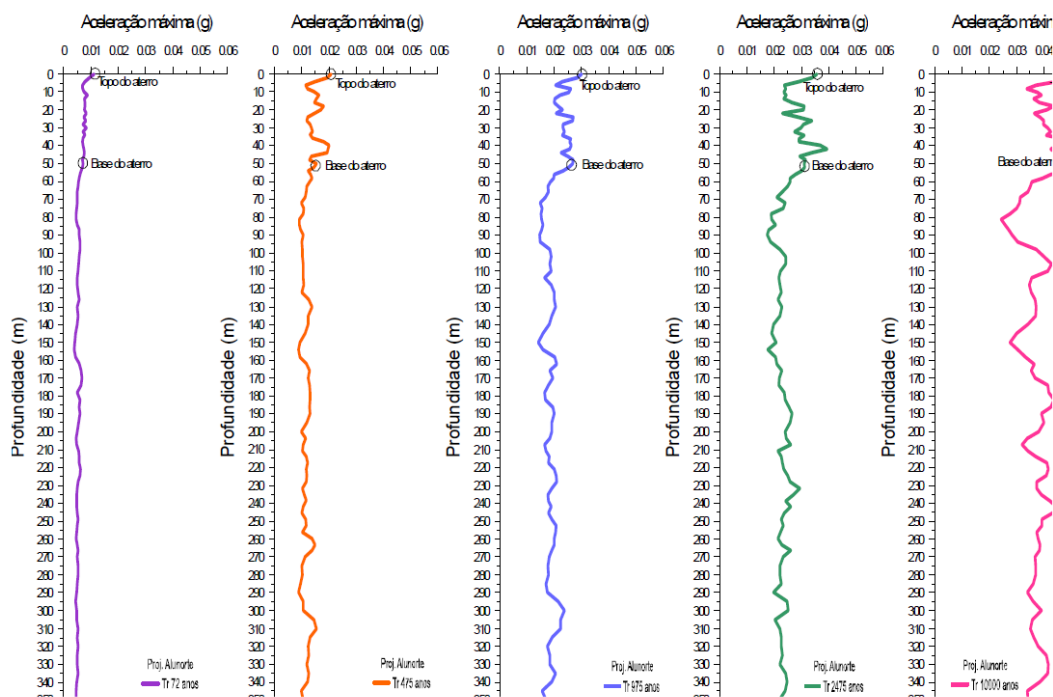

Figura 7.1 – Resposta sísmica 1D no sítio do projeto Alunorte para coluna de solo e aterro considerando sismos com diferentes períodos de retorno (LPS, 2017)

Tabela 7.6 – Coeficientes sísmicos das acelerações médias no corpo do aterro (LPS, 2017)

Sítio	Lei de atenuação	Aceleração horizontal máxima na rocha (g)				
		para um dado TR				
		72 anos	475 anos	975 anos	2.475 anos	10.000 anos
HYDRO-Alunorte	Toro (1997,2002)	0,007g	0,015g	0,025g	0,033g	0,045g

Para o cálculo específico da aceleração a ser utilizada nas análises de estabilidade, a norma ABNT NBR 13.028/2017 recomenda os critérios especificados pela Canadian Dam Association – CDA, no documento *Dam Safety Guidelines – Guidelines to Mining Dam* (2019), onde a aceleração máxima horizontal (PGA) depende do Tempo de retorno – TR em função da classificação da barragem.

Sendo assim, seguindo recomendações apresentadas pela CDA no documento *Dam Safety Guidelines 2019*, a metodologia adotada pela FONNTES para determinação do Kh nesta auditoria consiste em:

- Classificação da barragem pelos critérios propostos pelo CDA;
- Determinação do tempo de retorno do sismo de projeto;
- Determinação do sismo de projeto;
- Realização da análise pseudoestática.

A classificação do DRS1 a partir da metodologia proposta pela CDA pode ser observada na Tabela 7.7.

ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO DRS1
Tabela 7.7 – Classificação do DRS1 (CDA, 2019).

CLASSIFICAÇÃO	POPULAÇÃO EM RISCO (NOTA 1)	PERDAS DE VIDA (NOTA 2)	VALORES CULTURAIS E AMBIENTAIS	INFRAESTRUTURA E ECONOMIA
Baixa	Nenhuma	0	- Perda mínima de curto prazo - Nenhuma perda de longo prazo	- Perdas econômicas baixas; - Área contém serviços e infraestrutura limitadas
Significativa	Apenas temporariamente	Não especificada	- Perda/deterioração não significativa de habitats naturais de vida silvestre ou aquática - Perdas limitadas a habitats marginais - Restauração e compensações altamente factíveis	- Perdas a instalações recreacionais, locações laborais temporárias, e rotas de transporte pouco utilizadas
Alta	Permanente	10 ou menos	- Perda/deterioração significativa habitat natural de vida silvestre ou aquática importantes - Restauração e compensações altamente possível	Perdas econômicas elevadas com consequências a infraestrutura, transporte público, e instalações comerciais
Muito Alta	Permanente	100 ou menos	- Perda/deterioração significativa de habitats naturais de vida silvestre ou aquática <i>críticos</i> - Restauração e compensações possíveis, mas impraticáveis	Perdas econômicas muito elevadas, afetando infraestrutura e serviços importantes (ex: rodovias, instalações industriais e de armazenamento de substâncias perigosas)
Extrema	Permanente	Mais de 100	- Perda/deterioração grave de habitats naturais de vida silvestre ou aquática - Restauração e compensações impossíveis	Perdas extremas afetando infraestrutura e serviços críticos (ex: hospitais, grandes complexos industriais e de armazenamento de substâncias perigosas)

Nota 1 - Definição de população em risco

Nenhuma - Não é verificada população em risco, não havendo possibilidade de perda de vidas além daquelas ligadas a qualquer infortúnio

Temporária - Pessoas que estão apenas de forma temporária na zona de inundação (ex: ocupação residencial sazonal, transeuntes em rotas de transporte, participação em atividades recreativas)

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO DRS1		

Permanente - A população em risco está habitualmente localizada na zona de inundação (ex: moradores permanentes); três classes de consequência (alta, muita alta e extrema) são propostas para permitir uma estimativa mais detalhada do potencial perda de vidas (para assistir o processo de tomada de decisões se análises apropriadas são feitas);

Nota 2- Implicações a perdas de vida

Não especificada - O nível apropriado de segurança em uma barragem onde pessoas estão temporariamente em risco depende do número de pessoas, do tempo de exposição, a natureza de sua atividade e outras condicionantes. Uma classe maior pode ser apropriada dependendo das exigências. No entanto, as exigências da análise de cheias, por exemplo, não pode ser maior se a população temporária não é provável de estar presente durante a temporada de cheias.

Para a classificação do DRS1 foram considerados os seguintes critérios:

- **População em Risco:** *Permanente*. A Zona de Autossalvamento (ZAS) definida a partir dos estudos de ruptura realizados Na Zona de Autossalvamento do DRS1, a população fixa corresponde a dois grupos: os profissionais, diretos e indiretos, em serviço na área do DRS1 e Refinaria (áreas internas da Alunorte) e a população residente na área adjacente (externa ao empreendimento).
- **Número de Vidas em Risco:** *Mais de 100*. A Zona de Autossalvamento (ZAS) definida a partir dos estudos de ruptura realizados possui ocupação dos funcionários que se encontram nas infraestruturas do empreendimento e população residente na área adjacente.
- **Perdas Ambientais e Culturais:** - Perda/deterioração significativa de habitats naturais de vida silvestre ou aquática críticos; - Restauração e compensações possíveis, mas impraticáveis;
- **Infraestrutura e Economia:** Perdas econômicas muito elevadas, afetando infraestrutura e serviços importantes (ex: rodovias, instalações industriais e de armazenamento de substâncias perigosas).

A classe de risco da estrutura é determinada pelo item de maior consequência. Assim, a estrutura foi classificada como risco extremo. Para estruturas de risco extremo, a CDA recomenda adotar para definição do sismo de projeto tempo de retorno de 10.000 anos ou MCE, conforme a Tabela 7.8.

ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO DRS1
Tabela 7.8 – Avaliação das probabilidades de excedência (CDA, 2019)

CLASSIFICAÇÃO (NOTA 1)	PROBABILIDADE DE EXCEDÊNCIA ANUAL - CHEIAS (NOTA 2)	PROBABILIDADE DE EXCEDÊNCIA ANUAL - TERREMOTOS (NOTA 3)
Baixa	1/100	1/100
Significativa	Entre 1/100 e 1/1.000 (nota 4)	Entre 1/100 e 1/1.000
Alta	1/3 entre 1/1.000 e PMF* (nota 5)	1/2.475 (nota 6)
Muito Alta	2/3 entre 1/1.000 e PMF* (nota 5)	1/2 entre 1/2.475 e 1/10.000 ou MCE* (nota 5)
Extrema	PMF* (nota 5)	1/10.000 ou MCE* (nota 5)

Esta tabela trata de apenas dois riscos naturais, e não considera que outro tipo de risco que possa ser considerado em avaliações de segurança de barragem

*PMF – probable maximum flood (máxima cheia provável); MCE – maximum credible earthquake (maior sismo credível); AEP – annual exceedance probability (probabilidade de excedência anual);

- 1 - Como definido na Tabela 4.1 - Classificação de Barragem;
- 2 - Simples extrapolação das estatísticas de cheias além de 10-3 AEP não é aceitável;
- 3 - Valores médios do intervalo estimado nos níveis de AEP para terremotos devem ser usados;
- 4 - Selecionado com base na análise incremental de cheias, exposição, e consequência de falha;
- 5 - PMF e MCE não tem AEP associados;
- 6 - Esse nível foi escolhido para garantir compatibilidade com o estabelecido nas normas de construção canadenses.

Conforme verificado no Relatório Final do Projeto As Is, documento RT-3540-54-G-1014, a Pimenta de Ávila seguiu as recomendações da ABNT NBR 13029:2017 para o cálculo específico da aceleração a ser utilizada nas análises de estabilidade. Portanto, adotou, as recomendações do boletim da *Canadian Dam Association (CDA), Application of Dam Safety Guidelines to Mining Dams – 2014*, revisado em 2019, que indica a adoção da aceleração da gravidade resultante do Sismo Máximo Provável (MCE – *Maximum Credible Earthquake*) ou de um tempo de retorno de 10.000 anos para estruturas de classificação “extrema”. Com isso, foi adotada uma aceleração horizontal de $a_h = 0,045g$, referente a um TR de 10.000 anos para a região em estudo, conforme indicado no relatório intitulado “Estudos de Avaliação de Ameaça Sísmica nos Sítios da HYDRO Paragominas e HYDRO Alunorte”, elaborado pela LPS Consultoria e Engenharia Ltda em 2017 (documento de referência nº RT-8400-54-G-019).

Foi considerada ainda, um valor para aceleração vertical equivalente à dois terços da aceleração horizontal (Newmark & Hall, 1982, apud Sarma & Scorer, 2009), ou seja, $a_v =$

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO DRS1		

0,03g. A aceleração vertical foi aplicada em ambos os sentidos (positivo e negativo), de forma a encontrar a condição mais crítica para cada seção estudada.

7.3 ANÁLISES DE ESTABILIDADE

Neste item, são apresentados os modelos matemáticos de estabilidade que foram verificados e atualizados pela FONNTES considerando a base topográfica do Depósito DRS1 realizada em janeiro/2022 (doc. D1-8600-54-L-2316-R0) e recebida no âmbito dessa auditoria. Os estudos foram realizados para as seções de controle que são tradicionalmente utilizadas para essa verificação das estruturas, estas serão apresentadas no item 7.3.2.

As análises de estabilidade que serão realizadas têm como objetivo a reavaliação dos modelos matemáticos elaborados para se calcular os fatores de segurança da estrutura (item 7.3.4), assim como verificar se os fatores de segurança obtidos estão em conformidade com os critérios estabelecidos por norma técnica vigente, como a ABNT NBR 13.029 e ABNT NBR 13.028, e boas práticas de Engenharia (item 7.3.5), os critérios serão apresentados no item 7.3.1.

Para execução das análises de estabilidade foi proposto a utilização do software Slope/W da fabricante Geostudio, contudo será utilizado o software Slide2 da fabricante Rocscience, sendo este um software de mercado tão utilizado quando o Slope/W, cujos resultados são os mesmos.

Os parâmetros de resistência de cada material foram reavaliados conforme apresentado no documento FG-2201-NHB-A-BA-RT19 – Avaliação dos Parâmetros Geotécnicos do DRS1, elaborado pela FONNTES.

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO DRS1		

7.3.1 Critérios Adotados

Para avaliação da segurança dos taludes da barragem, foram realizadas análises de estabilidade pelo método de Morgenstern-Price, baseado na teoria do Equilíbrio Limite, com auxílio do programa computacional Slide®2 da Rocscience.

Segundo Gerscovich (2016) a superfície de ruptura tende a ser circular em solos relativamente homogêneos, podendo ter uma aparência mais achatada na ocorrência de uma anisotropia mais significativa em relação a resistência. Já as superfícies planares ou translacionais caracterizam-se pelas descontinuidades ou planos de fraquezas. E, por fim, as rupturas de forma mista ocorrem quando há uma heterogeneidade, caracterizada pela presença de materiais ou descontinuidades com resistências mais baixas. Portanto, nas análises foram buscadas superfícies circulares potenciais de ruptura otimizadas, em busca do menor fator de segurança (FS).

As seções de análises consideradas como representativas das condições de campo foram adotadas a partir das informações apresentadas nos documentos de referência e disponibilizados à FONNTES, sendo estas tradicionalmente utilizadas para essa verificação da estrutura com as condições da geometria atual a partir do último levantamento topográfico do Depósito DRS1, realizado em janeiro/2022 (doc. D1-8600-54-L-2316-R0). As seções de análise serão apresentadas no item 7.3.2.

O modelo numérico foi construído com a hipótese de fluxo permanente com poropressões atribuídas por meio de uma superfície freática na fundação e uma linha piezométrica na superfície do resíduo. De forma conservadora, a linha freática foi atribuída à fundação levando em consideração os registros máximos históricos dos piezômetros e medidores de nível d'água instalados no maciço, além dos poços de monitoramento em proximidade das seções de referência, com exceção dos picos que, possivelmente, poderiam ser atribuídos à recarga superficial.

Para avaliação dos limites aceitáveis de fatores de segurança, conforme diretrizes da ABNT NBR 13.028/2017, foram adotadas as condições explicitadas na Tabela 7.9 a seguir. Deve-se destacar que para a condição não drenada a norma efetivamente não define o valor do fator, deixando a critério da projetista. No entanto, adota-se o valor estabelecido na Resolução Nº. 95, de 07/02/2022, da Agência Nacional de Mineração (ANM), como boa prática de engenharia e sugestão dessa auditoria considerando princípio da precaução, tendo em vista que a Hydro está sob jurisdição da SEMAS.

Tabela 7.9 – Critérios adotados para fatores de segurança

REGIMES DE SOLICITAÇÃO	Talude	FATORES DE SEGURANÇA MÍNIMOS ADMITIDOS
<u>Análise Estática:</u> Condição atual com freática definida a partir das leituras de instrumentação fornecida. Análise do talude de jusante.	Jusante	1,5 ¹
	Entre bermas	1,3 ¹
<u>Análise Pseudoestática:</u> Condição atual com freática definida a partir das leituras de instrumentação fornecida e coeficiente da aceleração da gravidade. Análise do talude de jusante. Parâmetros não drenados de pico para os materiais sujeitos à mobilização por resistência não drenada.	Jusante	1,1 ¹
<u>Análise não drenada de pico:</u> Condição atual com freática definida a partir das leituras de instrumentação fornecida. Análise do talude de jusante. Parâmetros não drenados de pico para os materiais sujeitos à mobilização por resistência não drenada.	Jusante	1,3 ²

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

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

ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO DRS1

7.3.2 Seções de Análise

As análises de estabilidade foram realizadas em 6 (seis) seções geotécnicas, representativas do DRS1, sendo estas as seções A, D, H, K, N, Q. A Figura 7.2 apresenta a locação das seções de análises do DRS1, conforme indicado no Relatório da Inspeção de Segurança Regular do DRS1, documento RT-469137-54-G-0003, elaborado pela GEOCONSULTORIA, em janeiro de 2022.

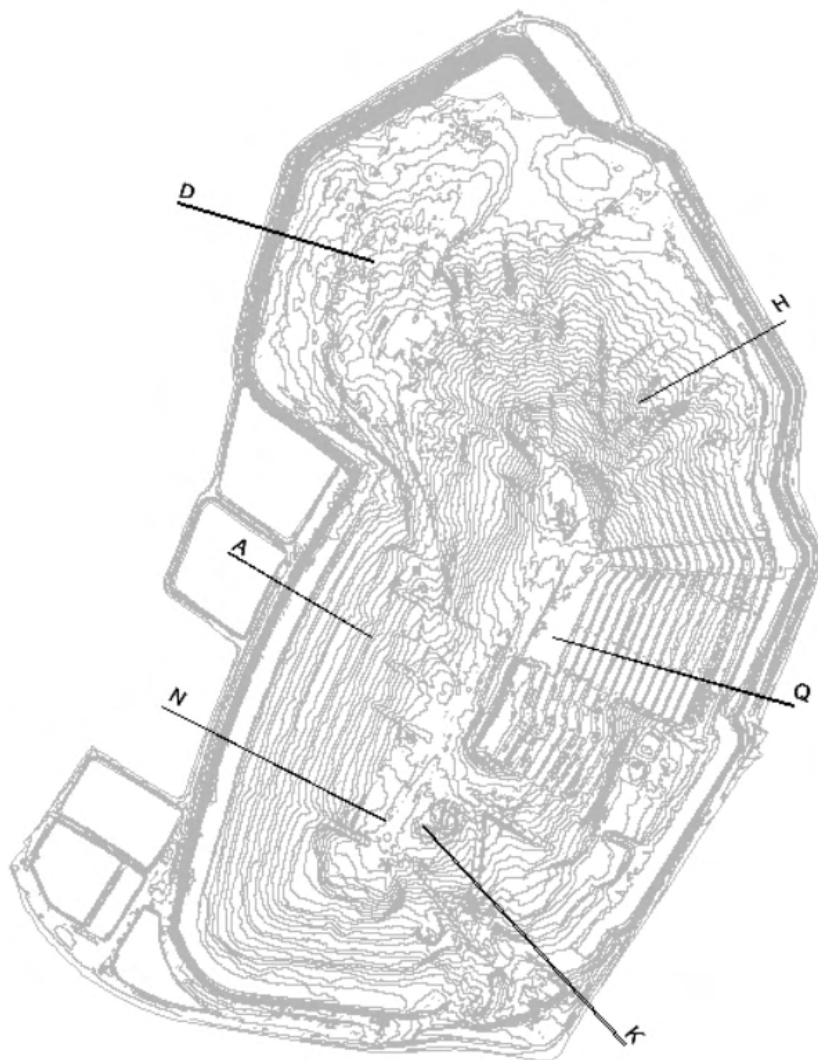


Figura 7.2 – Planta de locação das seções de análises

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO DRS1		

7.3.3 Verificação geométrica

As seções de análises consideradas como representativas das condições de campo foram adotadas a partir das informações apresentadas nos documentos de referência e disponibilizados para a FONNTES, sendo estas tradicionalmente utilizadas para essa verificação da estrutura.

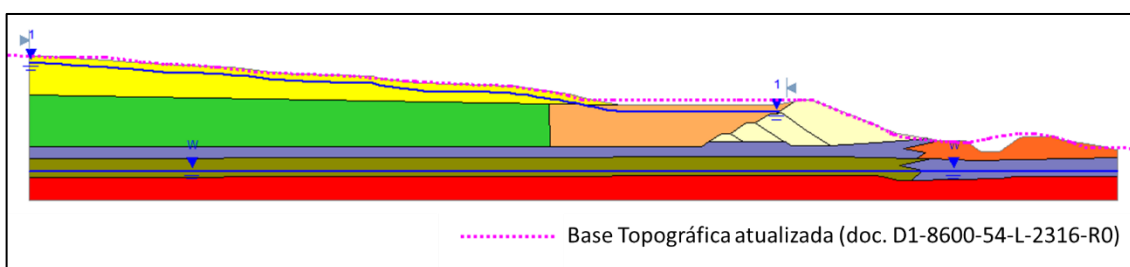
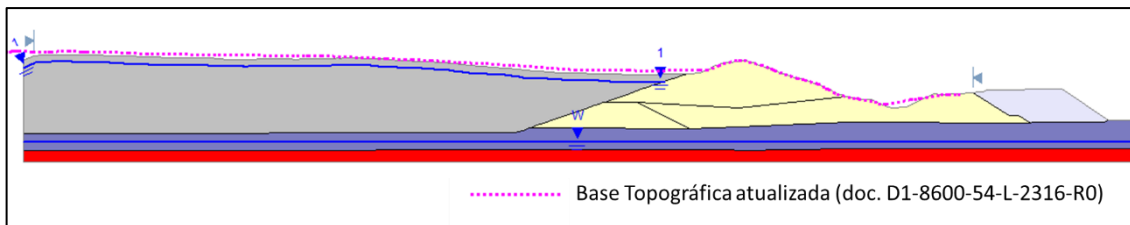
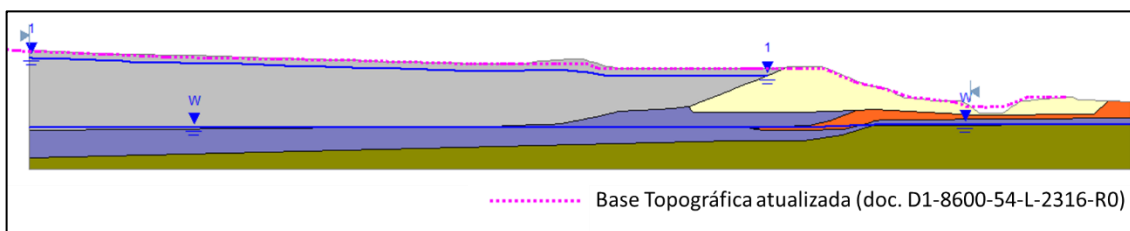
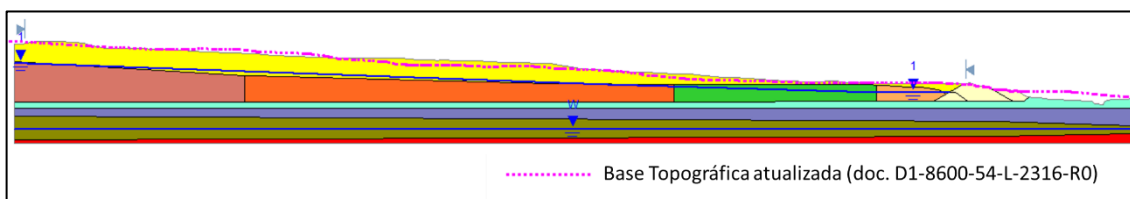
A verificação geométrica visou comparar a condição da geometria das seções nas análises de estabilidade mais recentes disponibilizadas para a FONNTES e realizadas pela GEOCONSULTORIA, em janeiro 2022, no Documento RT-469137-54-G-0003, Relatório da Inspeção de Segurança Regular do DRS1, com as condições da geometria atual, a partir do último levantamento topográfico disponibilizado para a FONNTES (desenhos: D1-8600-54-L-2314-R00, D1-8600-54-L-2315-R00 e D1-8600-54-L-2316-R00, elaborados pela HYDRO em janeiro de 2022).

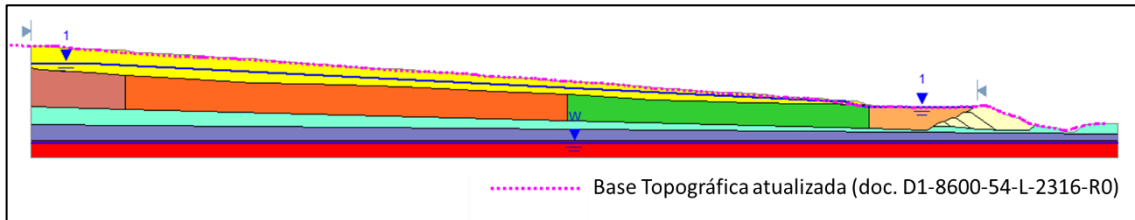
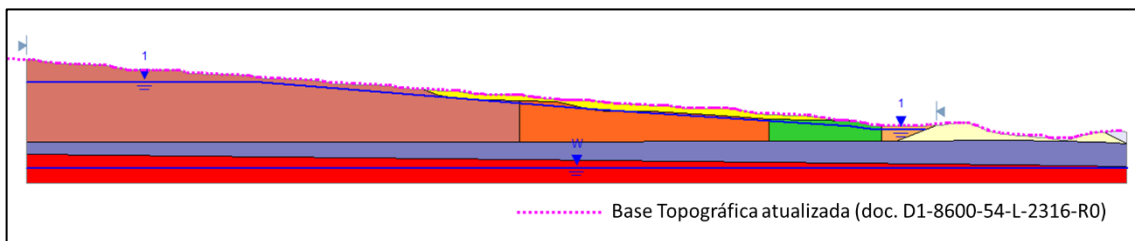
Os resultados gráficos da verificação estão apresentados da Figura 7.3 a Figura 7.8. É importante destacar alguns pontos nas análises:

- A geometria detalhada dos canais laterais não está contemplada no levantamento topográfico da superfície do resíduo disponibilizado para a FONNTES. Por isso nessas regiões de jusante da estrutura foi considerada a geometria elaborada nas seções da GEOCONSULTORIA. Cabe destacar que pela visita de campo e pelos levantamentos do projeto “As Is” (RT-3540-54-G-1014 R02) é possível afirmar que há aderência entre o modelo e o que está construído em campo;
- A partir da visita técnica realizadas no DRS1 foi possível concluir a aderência entre a geometria das seções nas análises de estabilidade mais recentes disponibilizadas para a FONNTES com a situação *in situ*. Essa afirmação é realizada a partir de uma inspeção visual e experiência em inspeção de estruturas, pois a geometria vista em campo está de fato materializada nas seções;

ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO DRS1

- A comparação da análise realizada na última auditoria realizada pela GEOCONSULTORIA e a topografia disponibilizada para a FONNTES resultou em condições geométricas similares para as seções Q, N, K e H;
- A comparação da análise realizada na última auditoria realizada pela GEOCONSULTORIA e a topografia disponibilizada para a FONNTES resultou na atualização das superfícies dos resíduos para as seções A e D.


Figura 7.3 – Comparação entre última auditoria e base topográfica atualizada – Seção A.

Figura 7.4 – Comparação entre última auditoria e base topográfica atualizada – Seção D

Figura 7.5 – Comparação entre última auditoria e base topográfica atualizada – Seção H


ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO DRS1
Figura 7.6 – Comparação entre última auditoria e base topográfica atualizada – Seção K

Figura 7.7 – Comparação entre última auditoria e base topográfica atualizada – Seção N

Figura 7.8 – Comparação entre última auditoria e base topográfica atualizada – Seção Q
7.3.4 Resultados

Como forma de avaliar a segurança geotécnica da estrutura, foram realizadas as análises de estabilidade conforme critérios estabelecidos por norma técnica vigente e apresentados no item 7.3.1.

Conforme descrito anteriormente, as análises de estabilidade foram realizadas com a hipótese de fluxo permanente com poropressões atribuídas por meio de uma superfície freática na fundação e uma linha piezométrica na superfície do resíduo. De forma conservadora, a linha freática foi atribuída à fundação levando em consideração os registros máximos históricos dos piezômetros e medidores de nível d'água instalados no maciço, além dos poços de monitoramento em proximidade das seções de leituras de pico anômalas atribuídas à recarga superficial.

Os resultados das análises de estabilidade para condição atual estática, pseudoestática e não drenada do DRS1 ao longo das seções analisadas são apresentados da Figura 7.9

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO DRS1		

a Figura 7.26, e um resumo dos resultados obtidos nas análises é apresentado na Tabela 7.10 a seguir.

Tabela 7.10 – Resumo das análises de estabilidade do DRS1

SEÇÃO	FATOR DE SEGURANÇA OBTIDO		
	CONDIÇÃO ESTÁTICA	CONDIÇÃO PSEUDOESTÁTICA	CONDIÇÃO NÃO DRENADA DE PICO
A-A	1,88	1,38	1,78
D-D	2,00	1,75	2,00
H-H	2,08	1,82	2,08
K-K	2,11	1,26	2,10
N-N	1,71	1,38	1,71
Q-Q	2,22	1,57	1,97

ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO DRS1

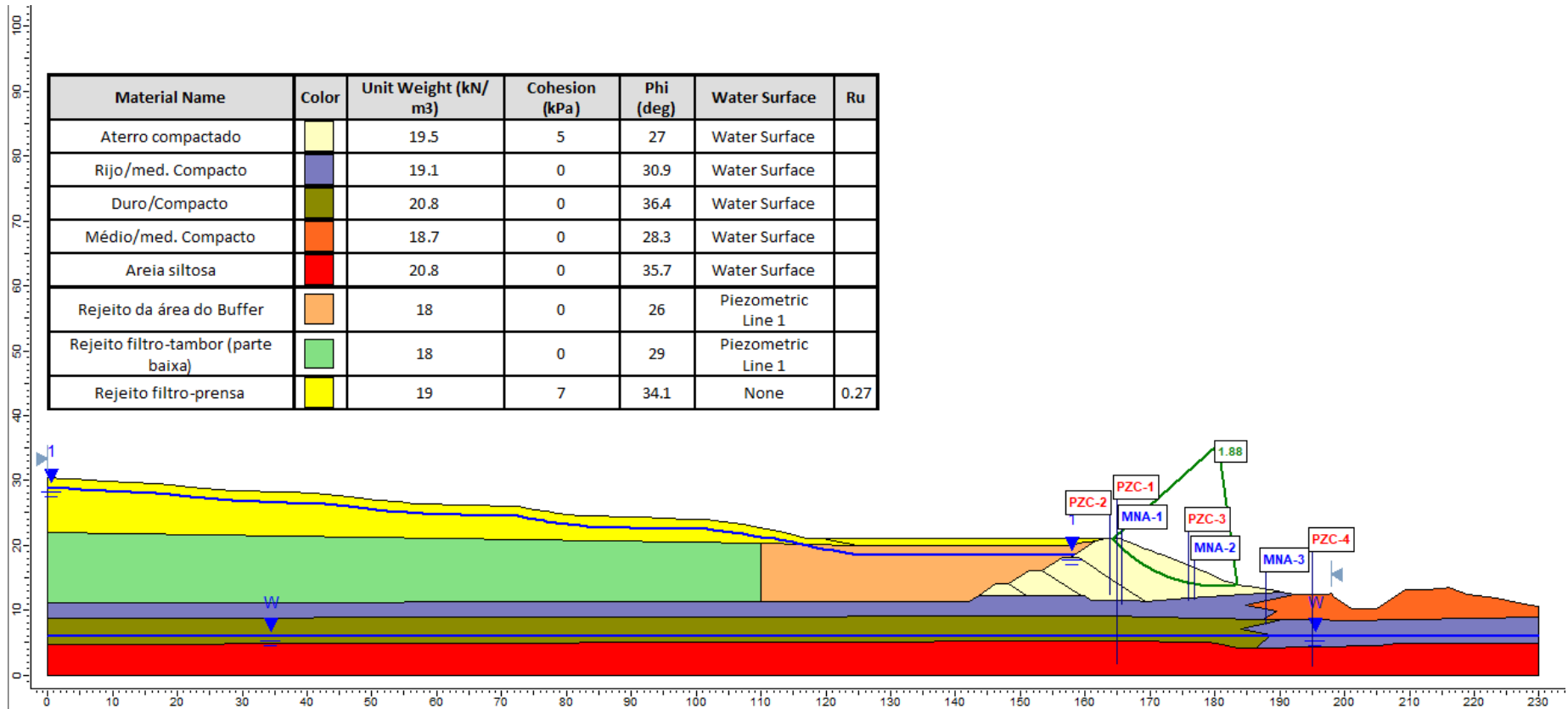


Figura 7.9 – Análise de estabilidade, condição estática – Seção A (Estaca 84)

ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO DRS1

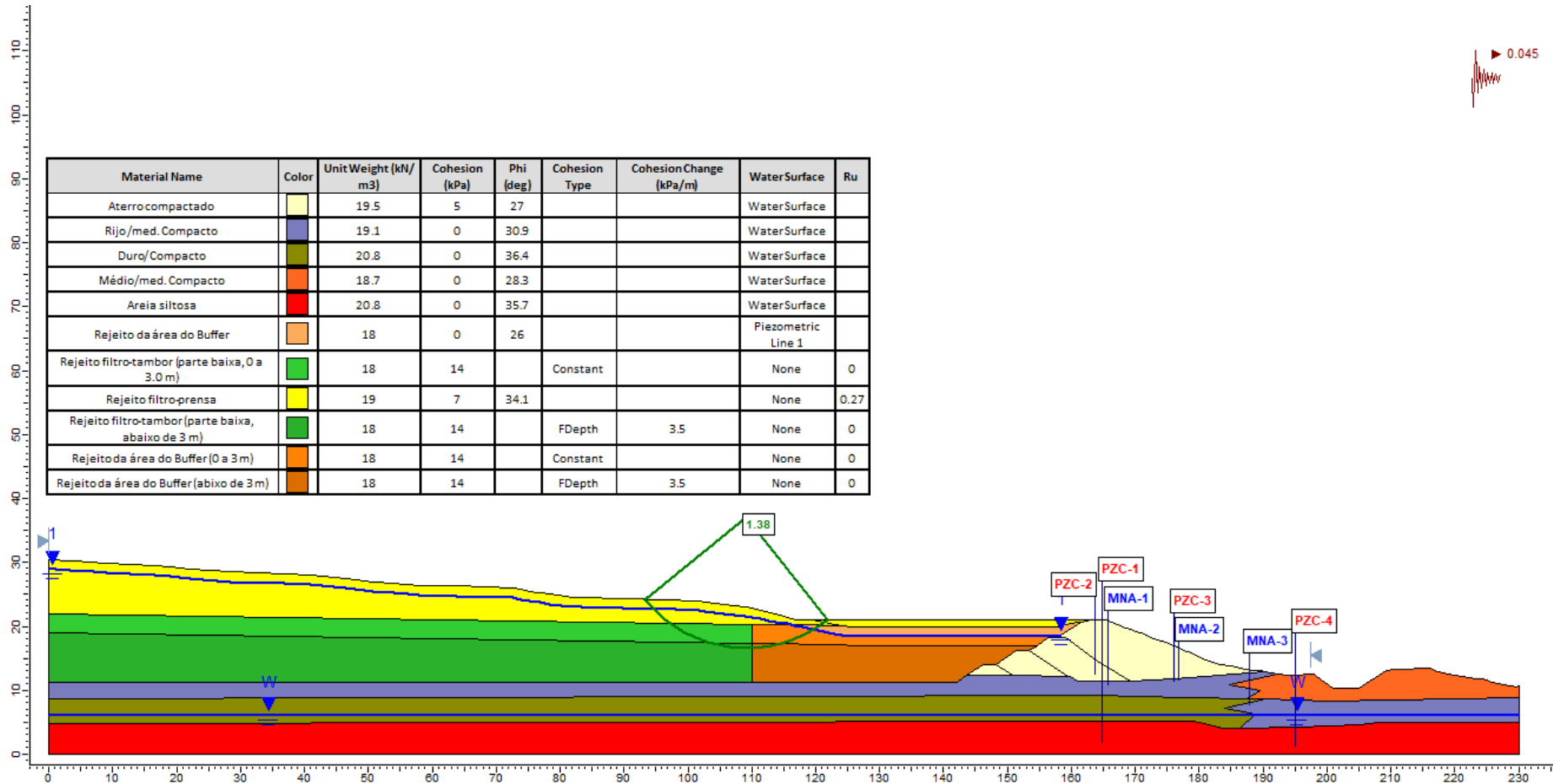
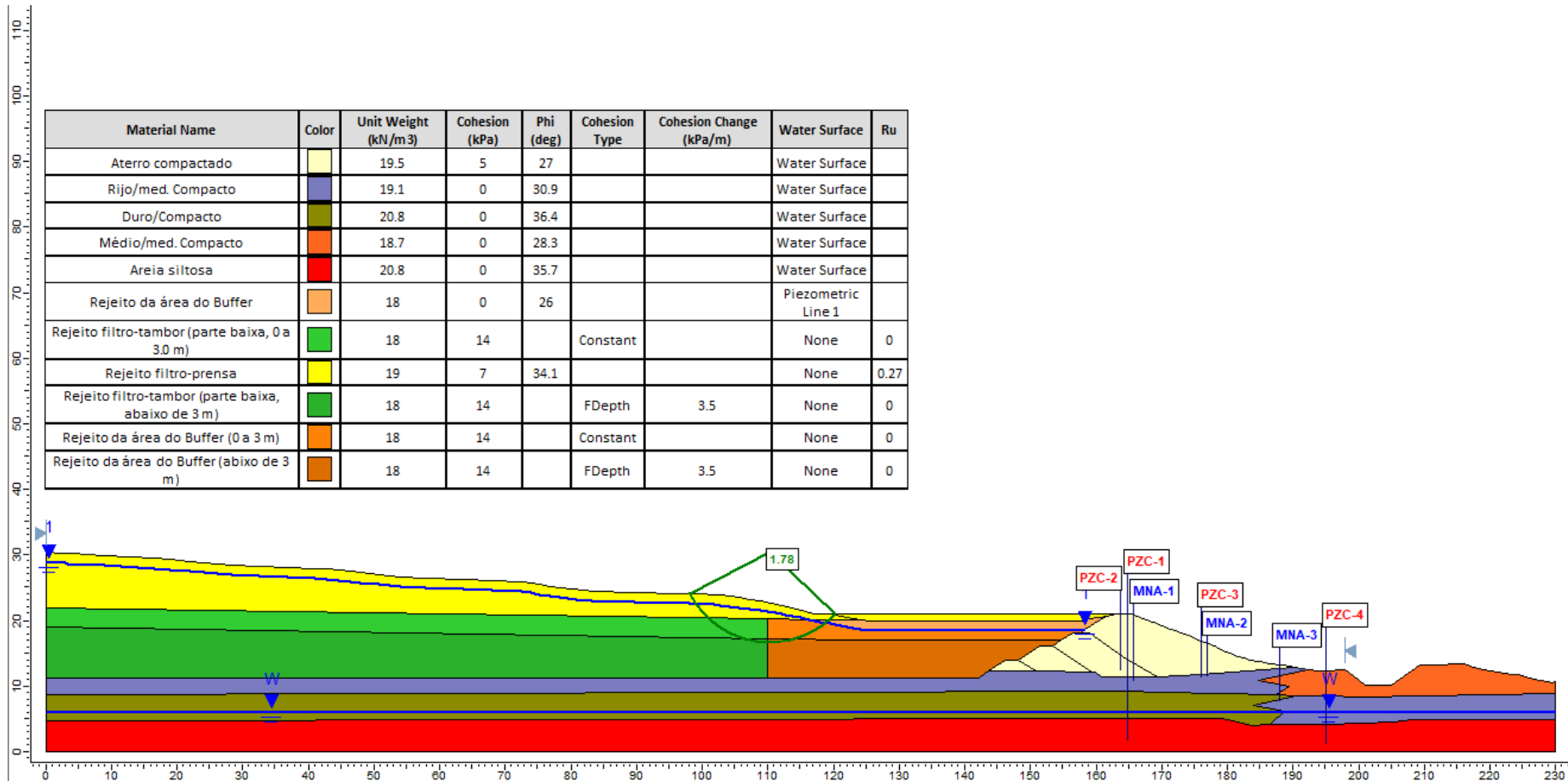


Figura 7.10 – Análise de estabilidade, condição pseudoestática – Seção A (Estaca 84)

ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO DRS1

Figura 7.11 – Análise de estabilidade, condição não drenada – Seção A (Estaca 84)

ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO DRS1

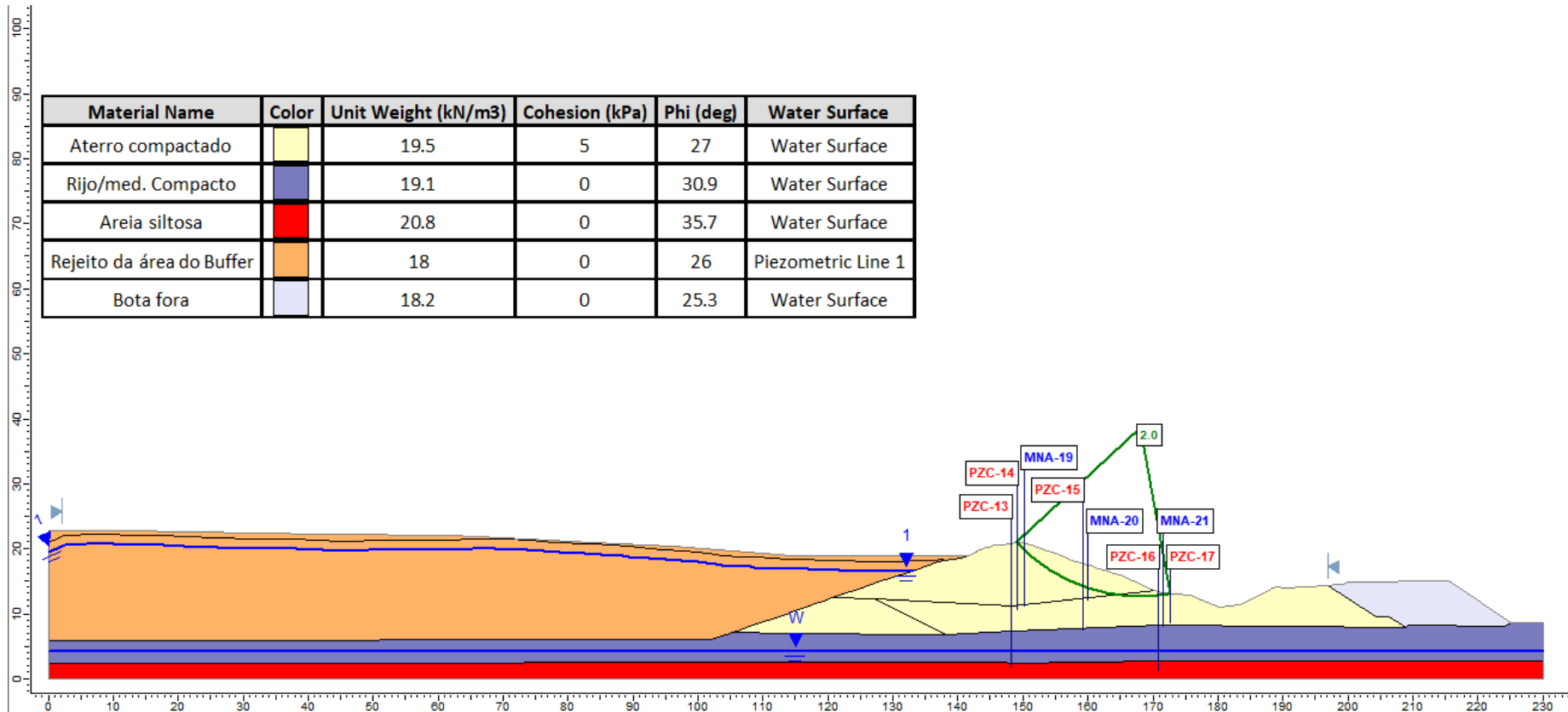


Figura 7.12 – Análise de estabilidade, condição estática – Seção D (Estaca 138)

ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO DRS1

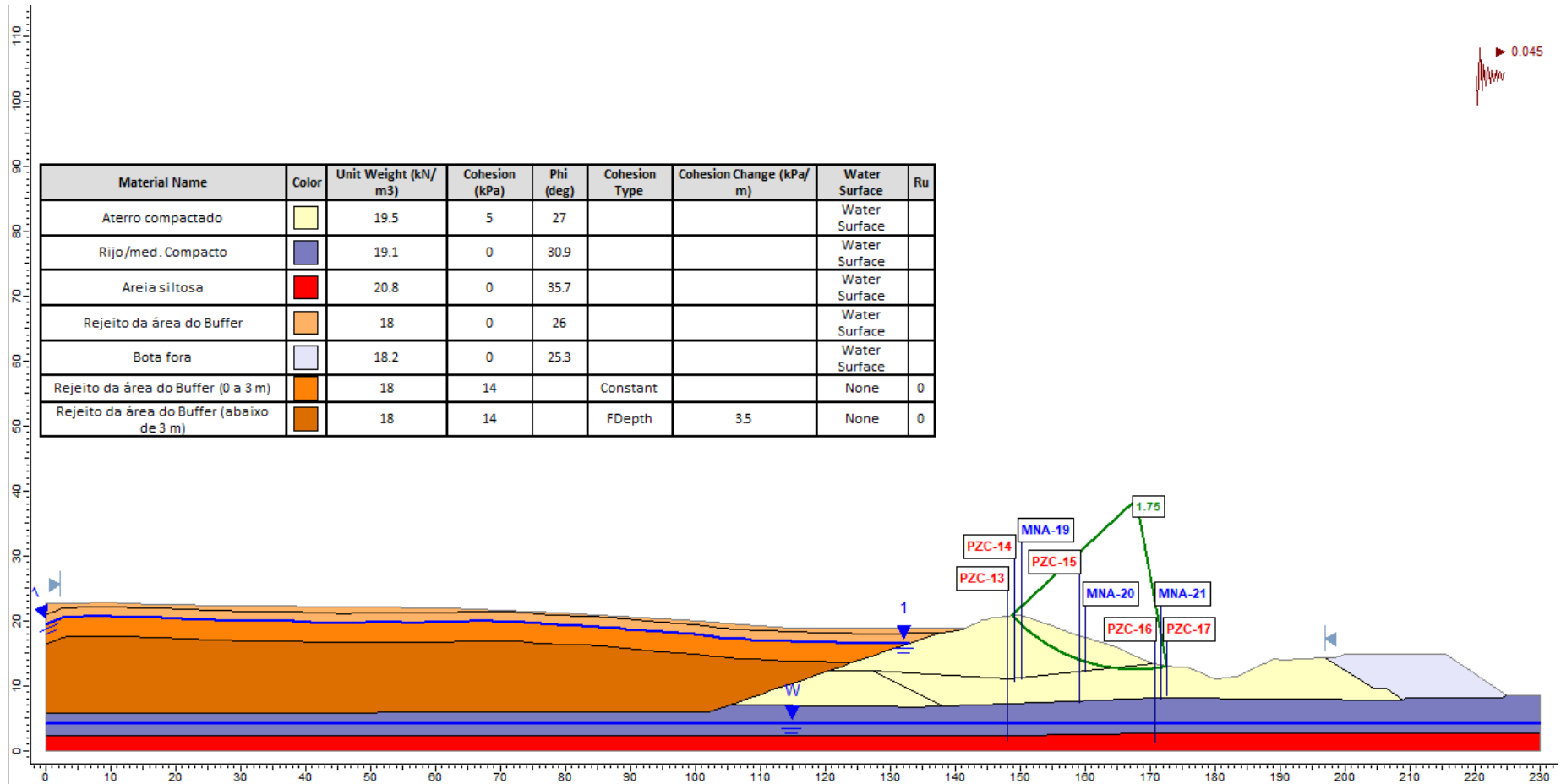
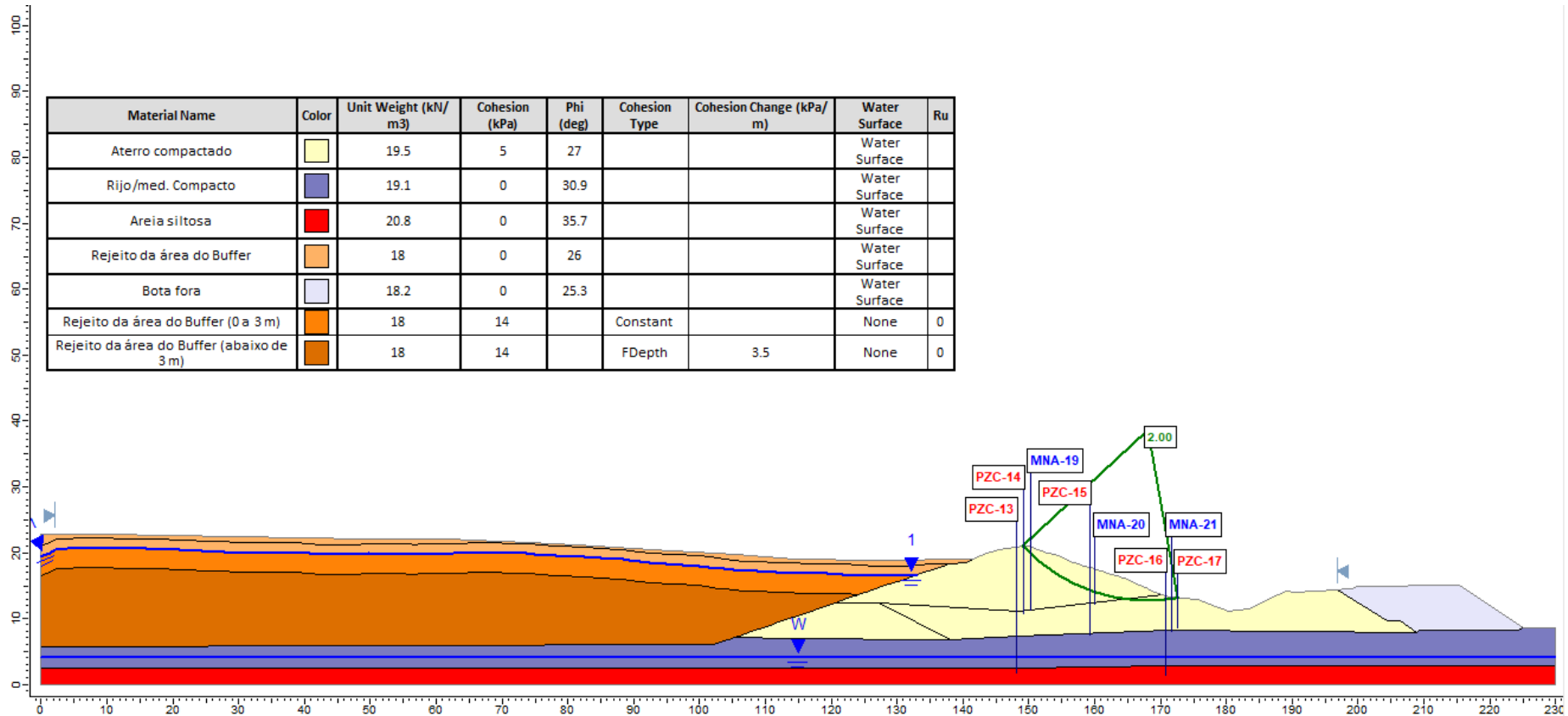


Figura 7.13 – Análise de estabilidade, condição pseudoestática – Seção D (Estaca 138)

ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO DRS1

Figura 7.14 – Análise de estabilidade, condição não drenada – Seção D (Estaca 138)

ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO DRS1

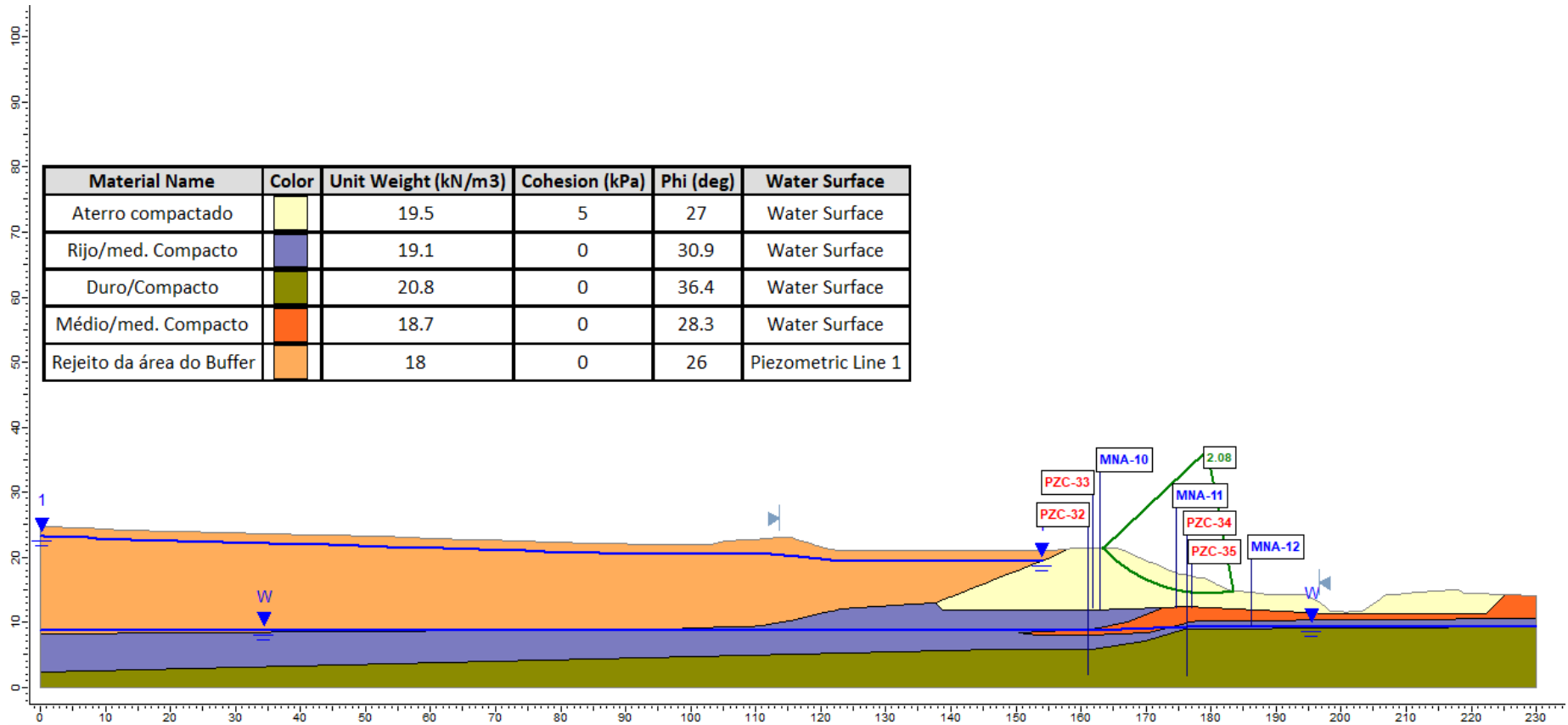
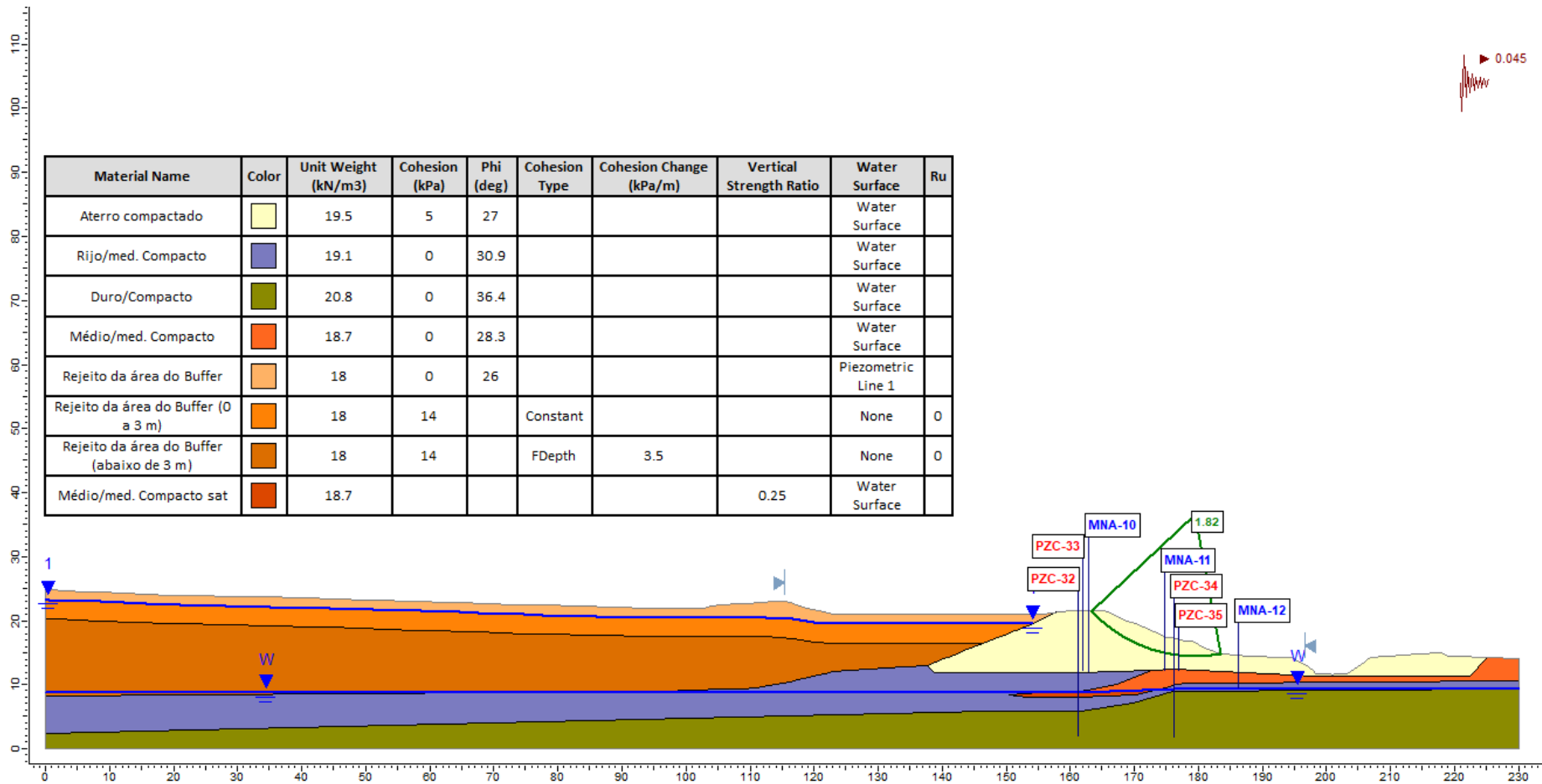


Figura 7.15 – Análise de estabilidade, condição estática – Seção H (Estaca 223)

ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO DRS1

Figura 7.16 – Análise de estabilidade, condição pseudoestática – Seção H (Estaca 223)

ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO DRS1

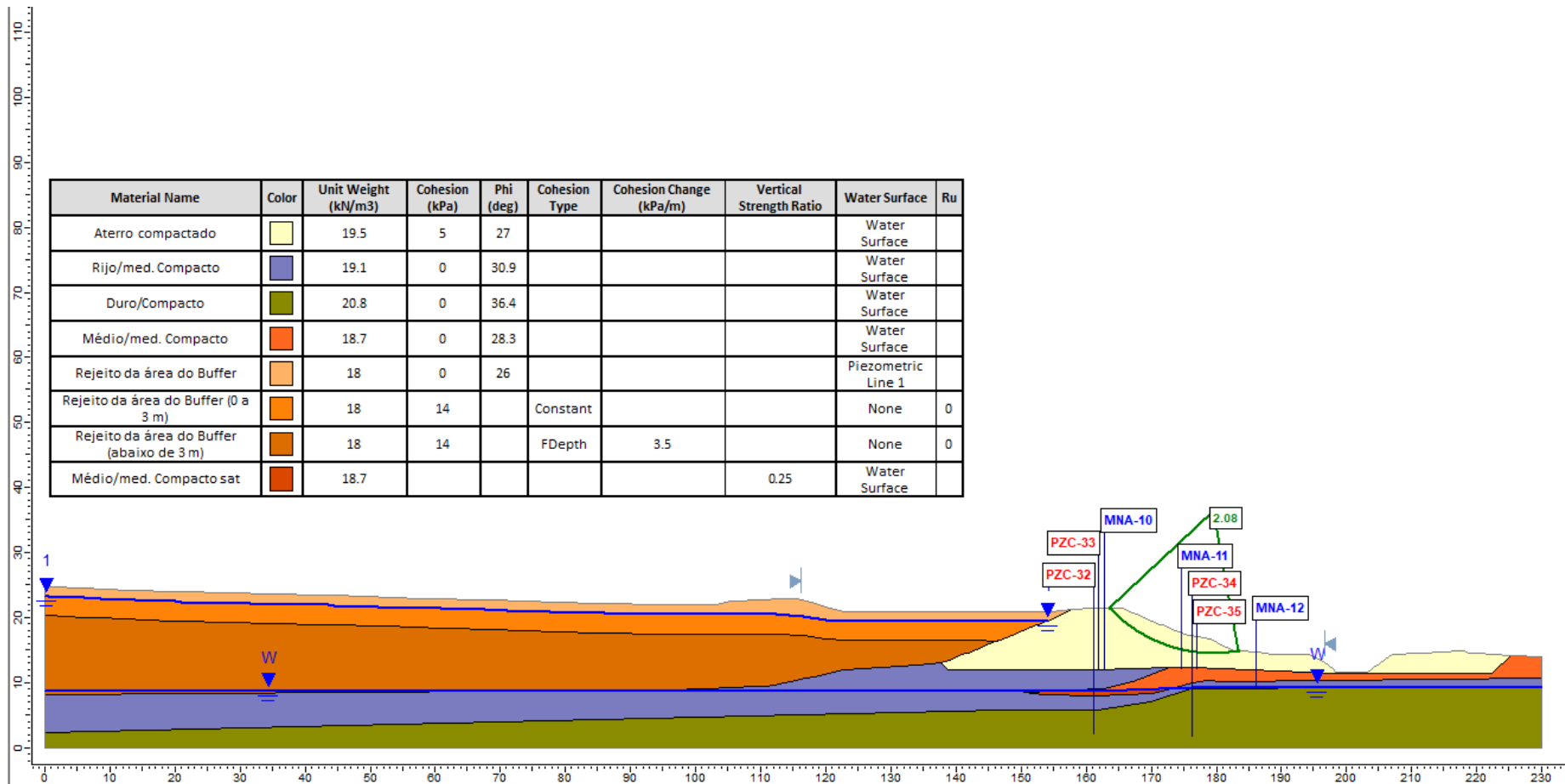


Figura 7.17 – Análise de estabilidade, condição não drenada – Seção H (Estaca 223)

ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO DRS1

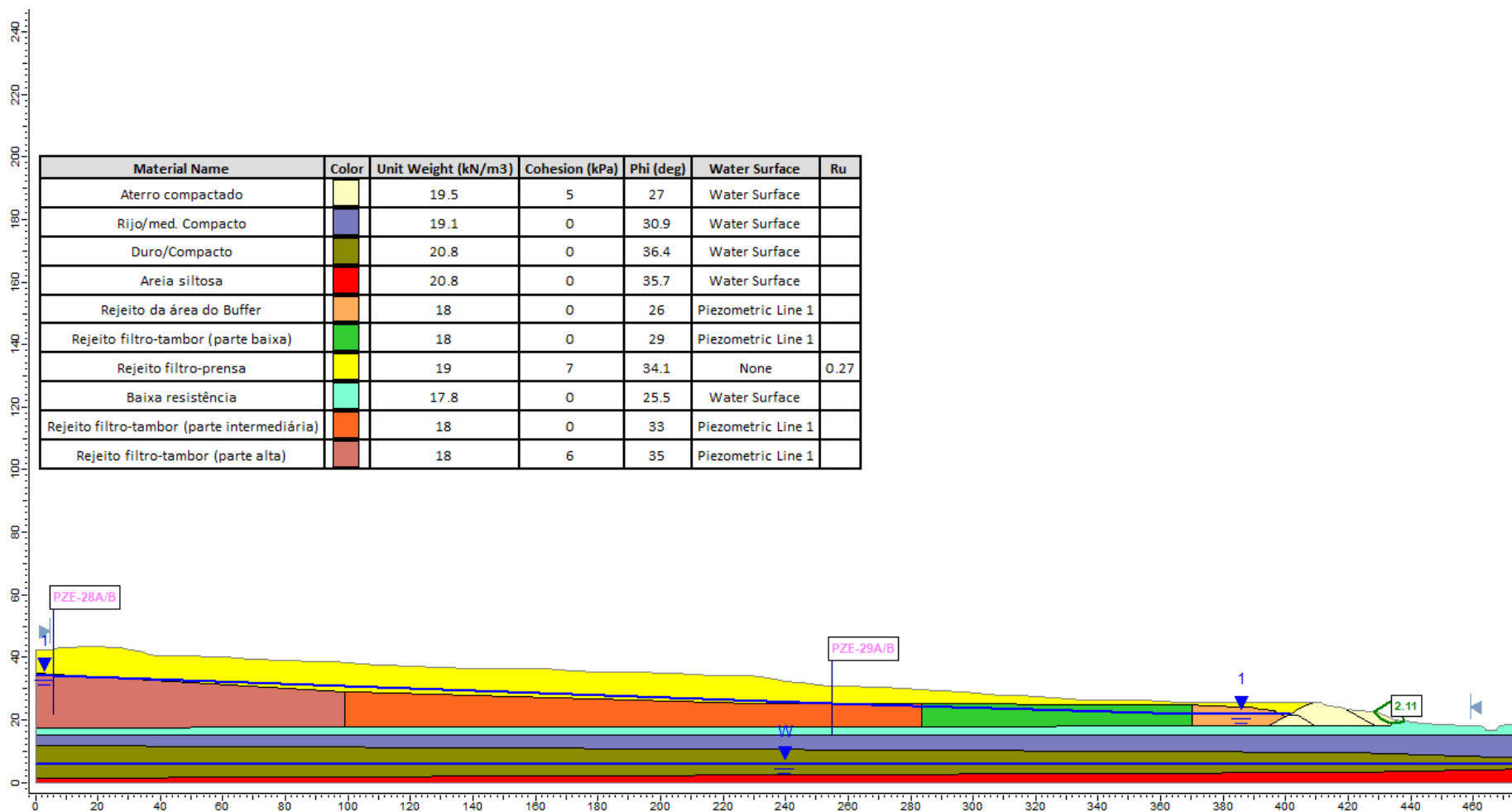


Figura 7.18 – Análise de estabilidade, condição estática – Seção K (Estaca 311~312)

ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO DRS1

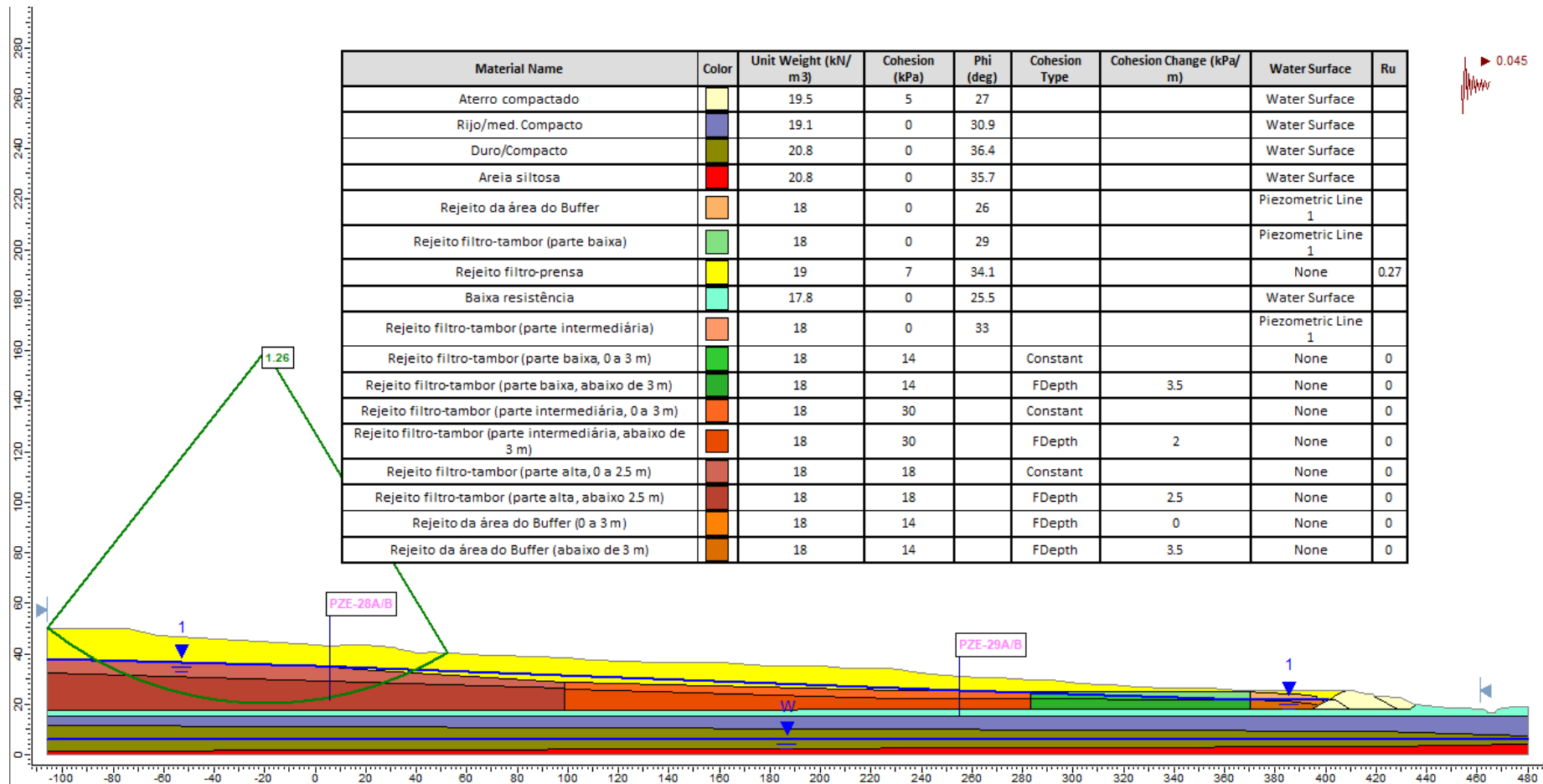


Figura 7.19 – Análise de estabilidade, condição pseudoestática – Seção K (Estaca 311~312)

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Cohesion Type	Cohesion Change (kPa/m)	Water Surface	Ru
Aterro compactado	Yellow	19.5	5	27			Water Surface	
Rijo/med. Compacto	Blue	19.1	0	30.9			Water Surface	
Duro/Compacto	Green	20.8	0	36.4			Water Surface	
Areia siltosa	Red	20.8	0	35.7			Water Surface	
Rejeito da área do Buffer	Orange	18	0	26			Piezometric Line 1	
Rejeito filtro-tambor (parte baixa)	Light Green	18	0	29			Piezometric Line 1	

ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO DRS1

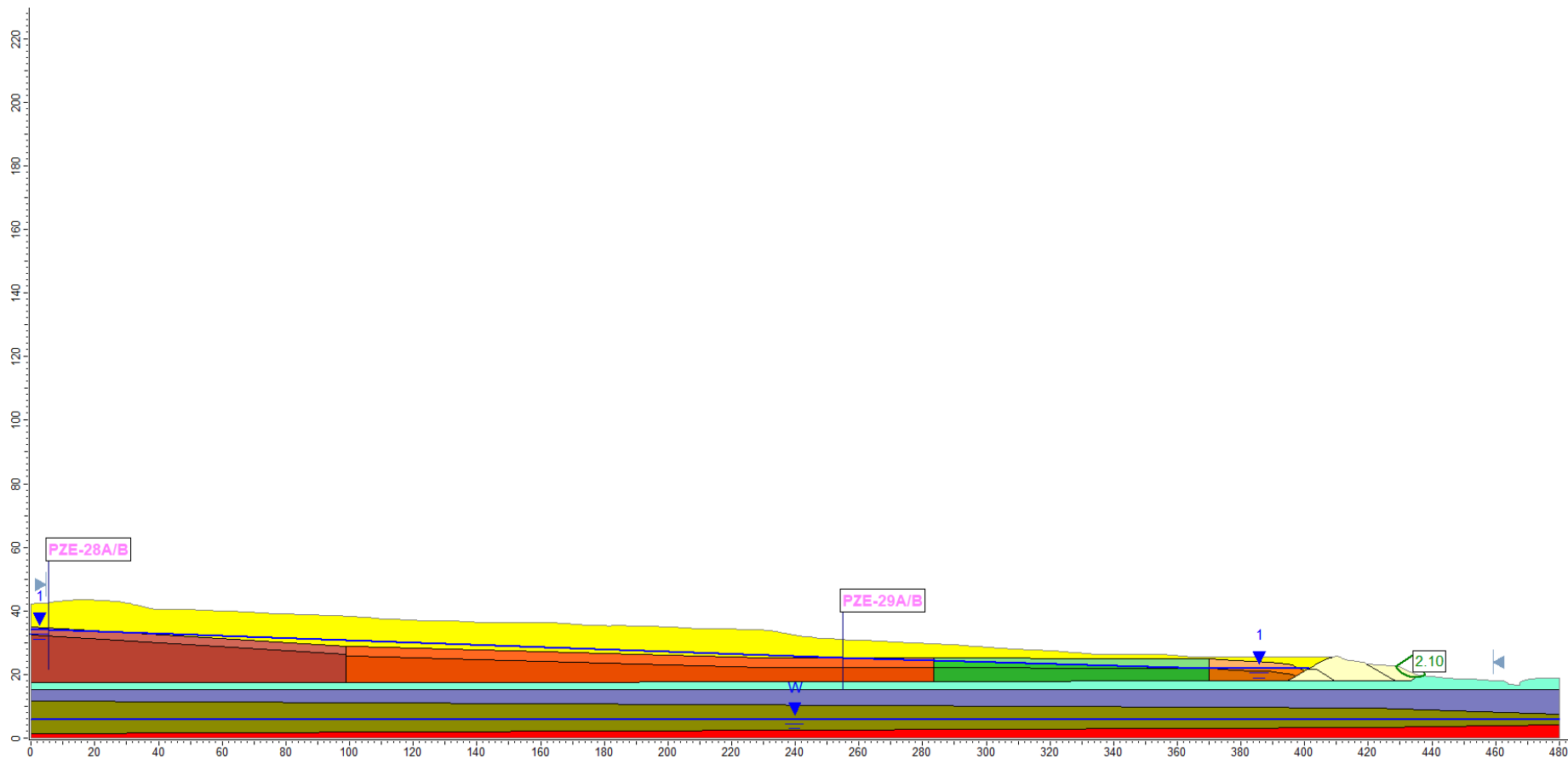
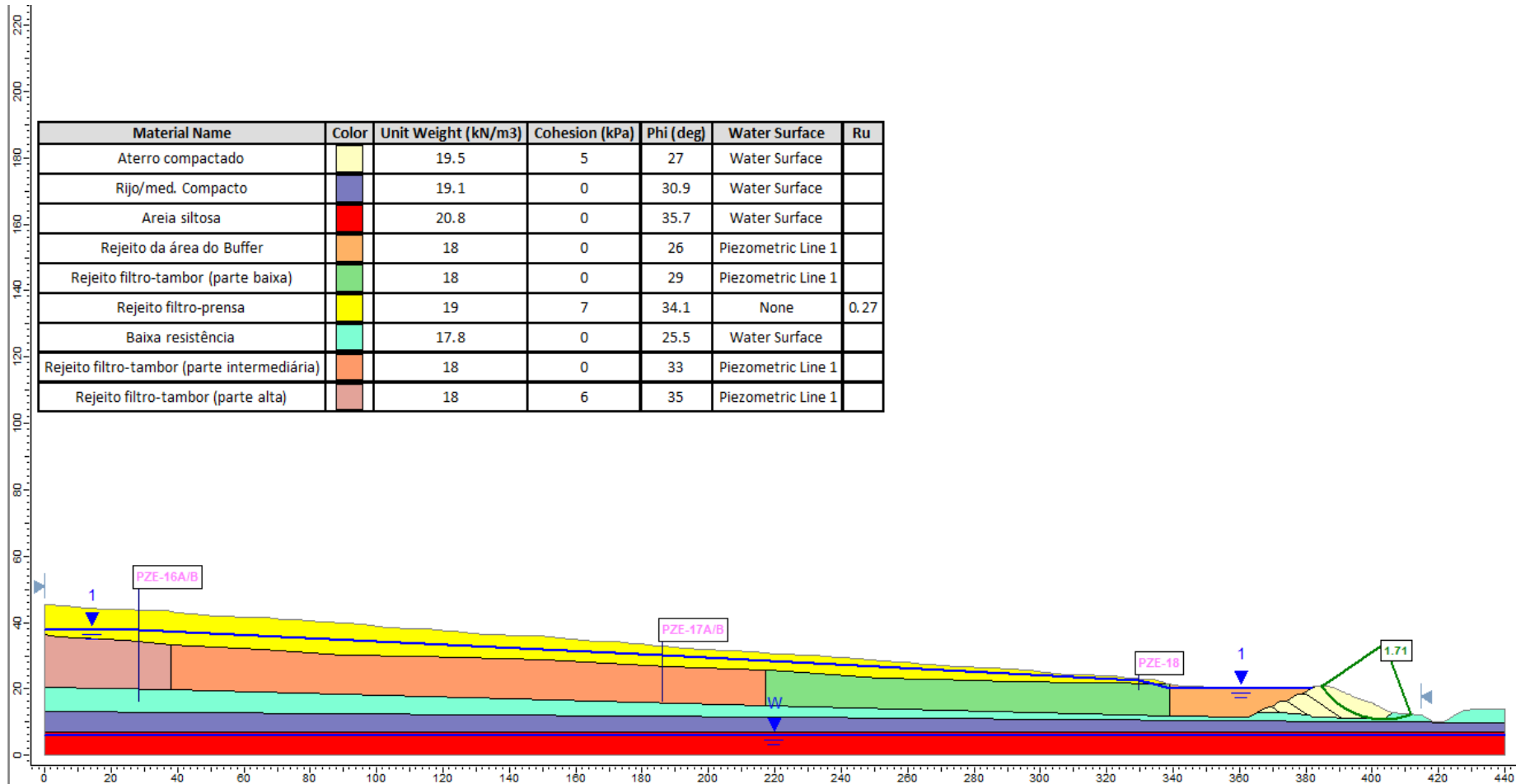
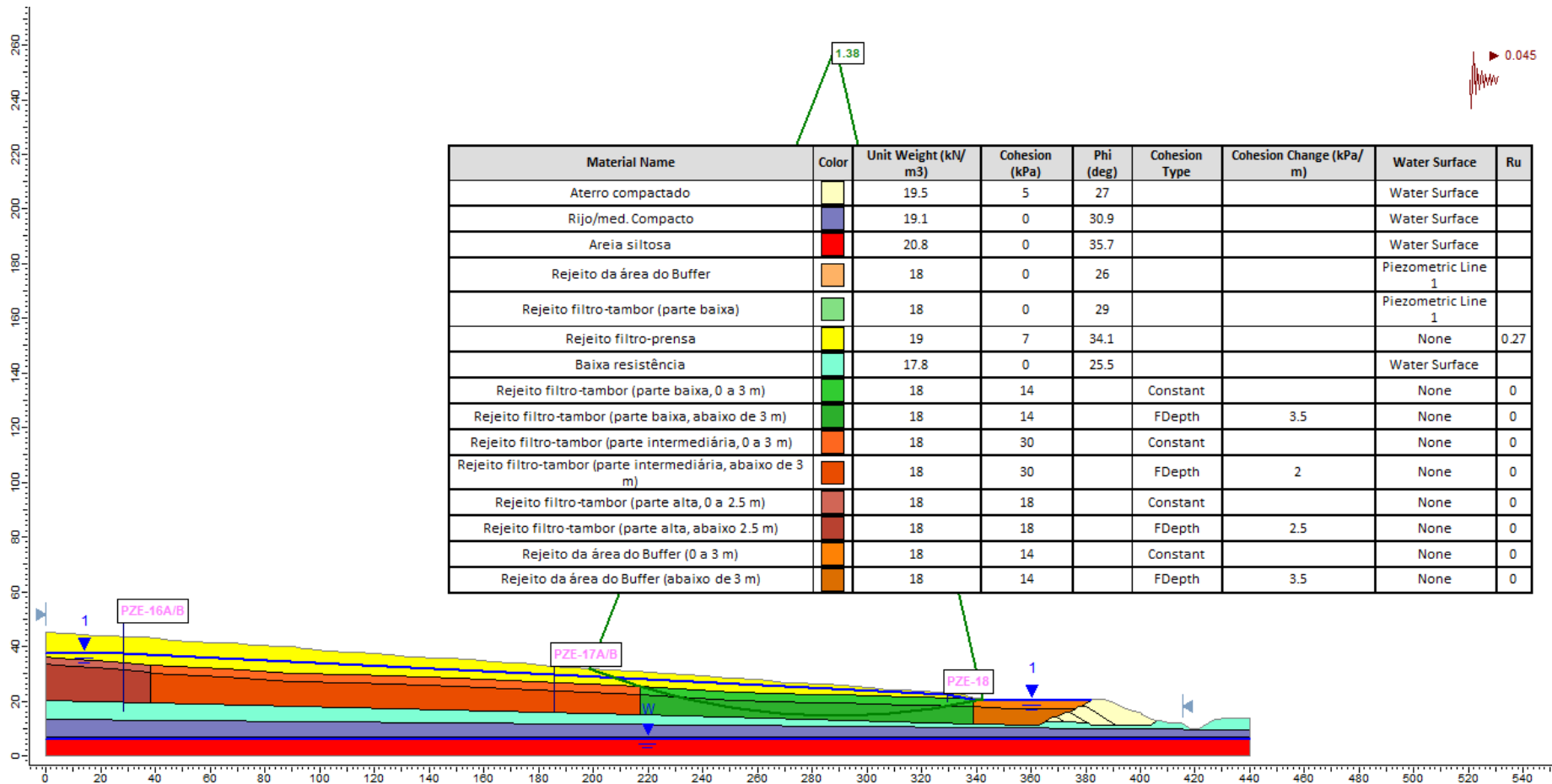
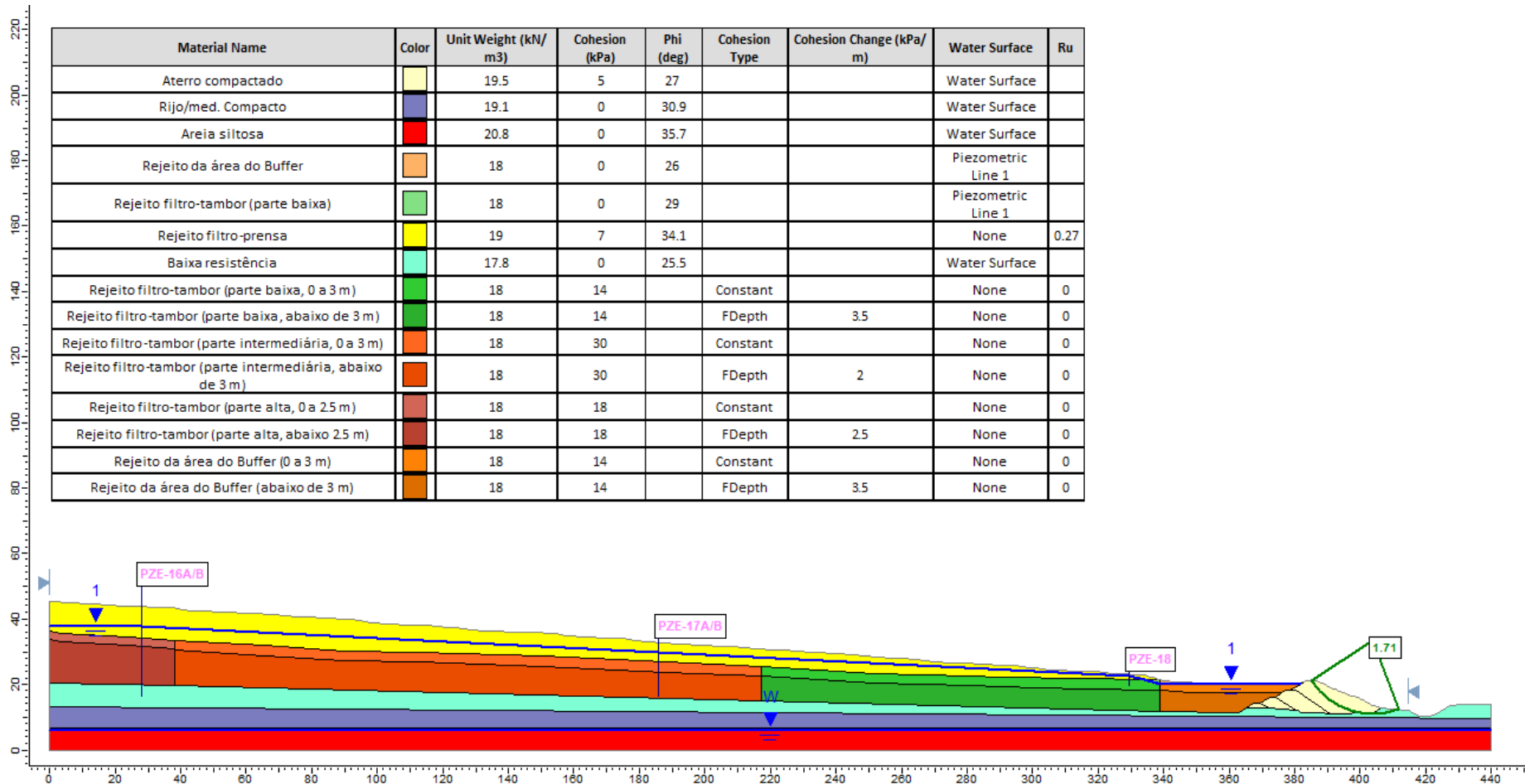
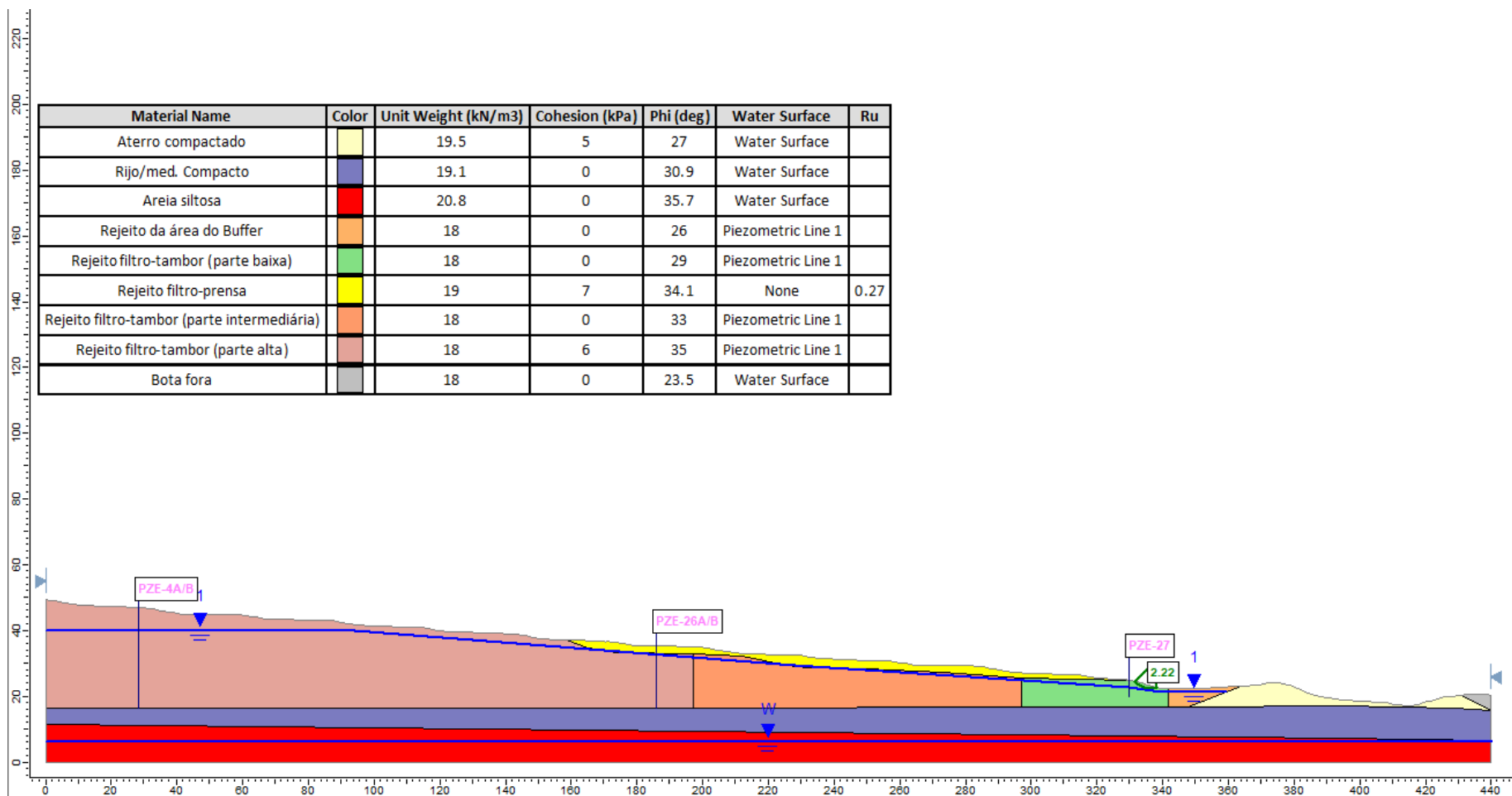


Figura 7.20 – Análise de estabilidade, condição não drenada – Seção K (Estaca 311~312)

ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO DRS1

Figura 7.21 – Análise de estabilidade, condição estática – Seção N (Estaca 64)

ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO DRS1

Figura 7.22 – Análise de estabilidade, condição pseudoestática – Seção N (Estaca 64)

ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO DRS1

Figura 7.23 – Análise de estabilidade, condição não drenada – Seção N (Estaca 64)

ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO DRS1

Figura 7.24 – Análise de estabilidade, condição estática – Seção Q

ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO DRS1

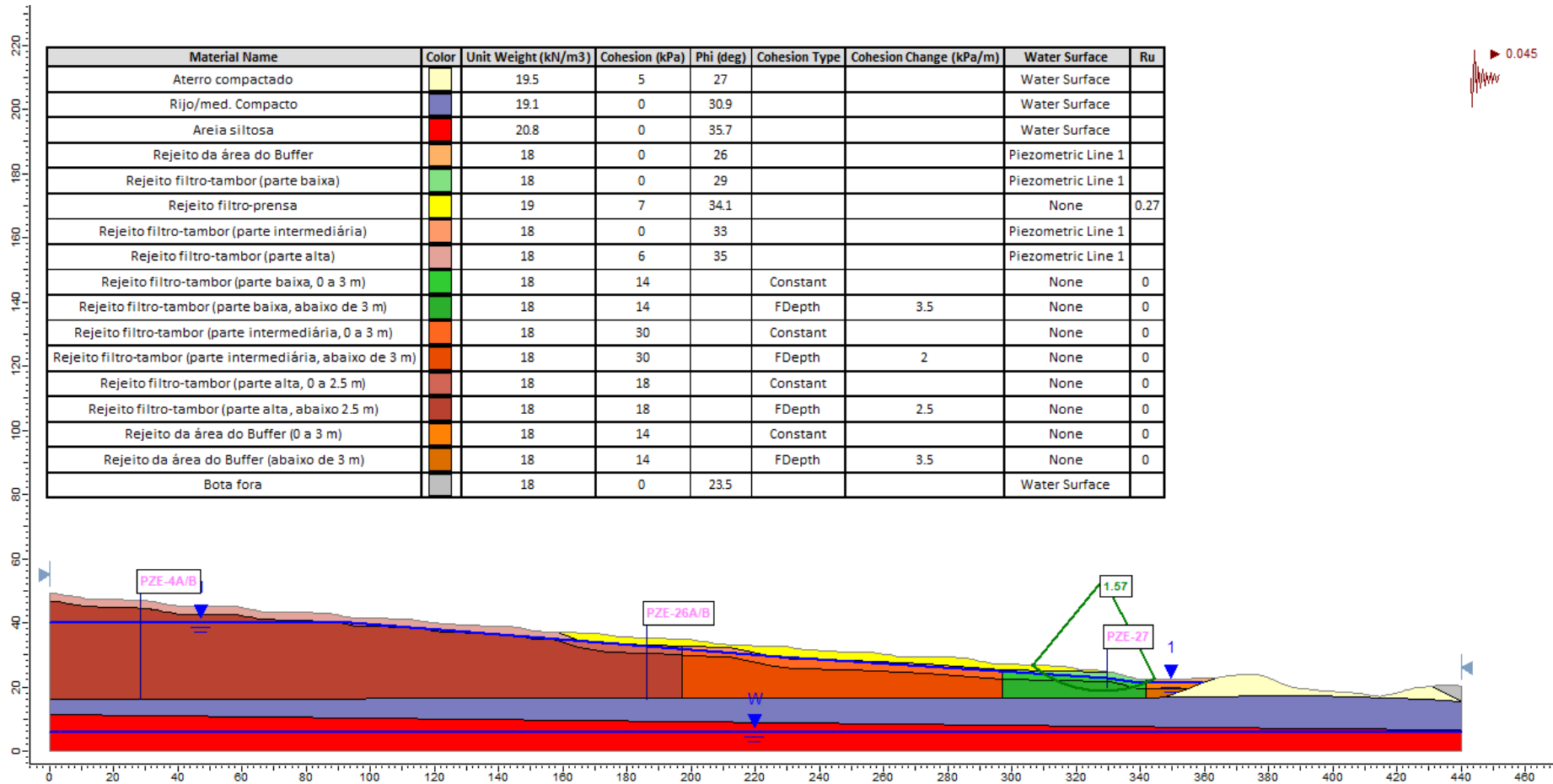
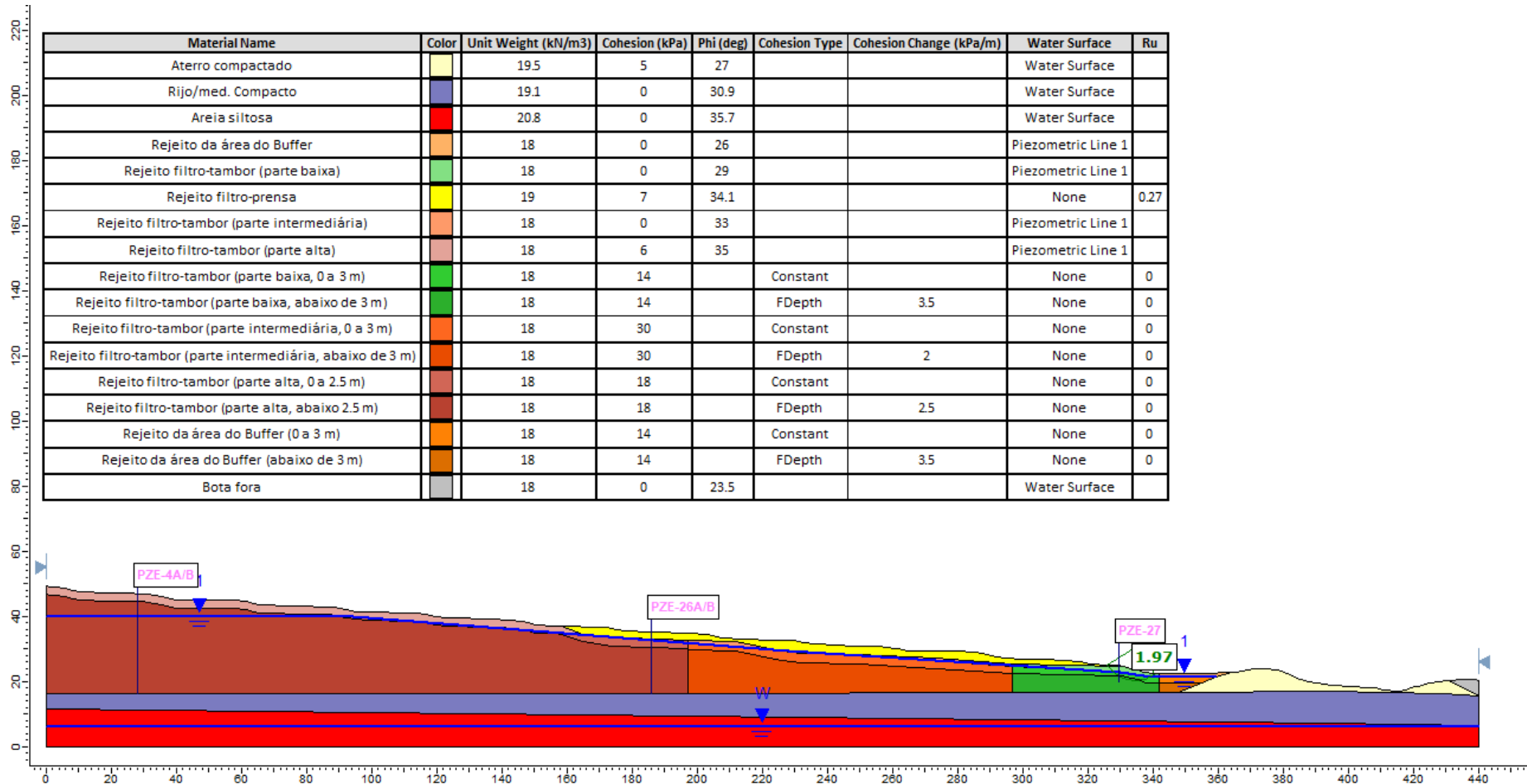


Figura 7.25 – Análise de estabilidade, condição pseudoestática – Seção Q

ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO DRS1

Figura 7.26 – Análise de estabilidade, condição não drenada – Seção Q

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO DRS1		

7.3.5 Comparação dos Fatores de Segurança Encontrados

Este item tem como objetivo a comparação entre os fatores de segurança obtidos nas análises de estabilidade realizadas a partir dos modelos matemáticos refeitos pela FONNTES e aqueles que foram encontrados a partir das análises de estabilidade mais recentes da estrutura.

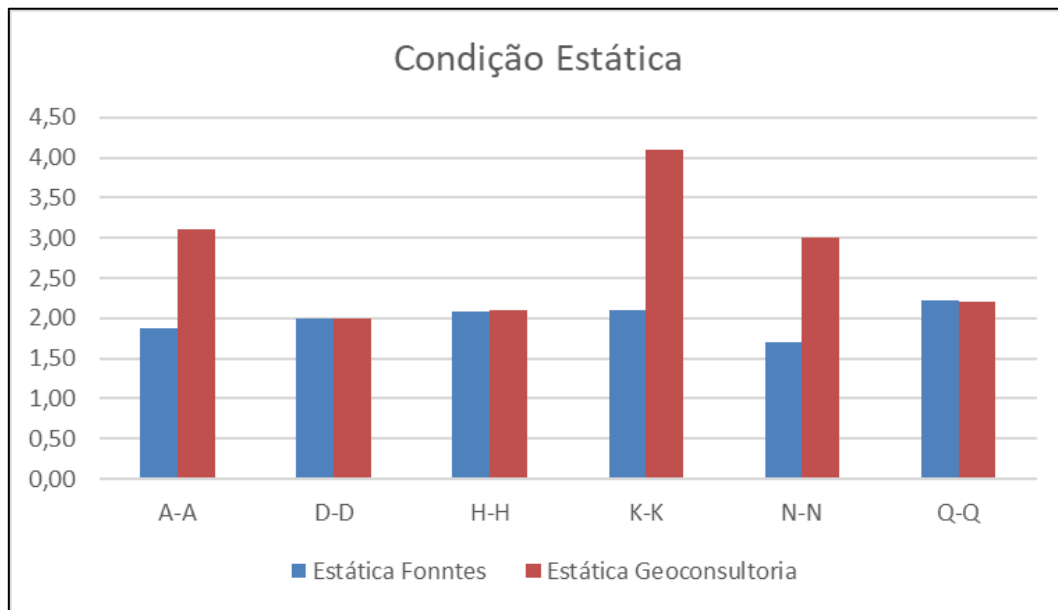
O estudo mais recente realizado na estrutura e disponibilizado para a FONNTES foi o Relatório da Inspeção de Segurança Regular do DRS1, elaborado pela GEOCONSULTORIA em junho de 2022, documento RT-469137-54-G-0003-rev02.

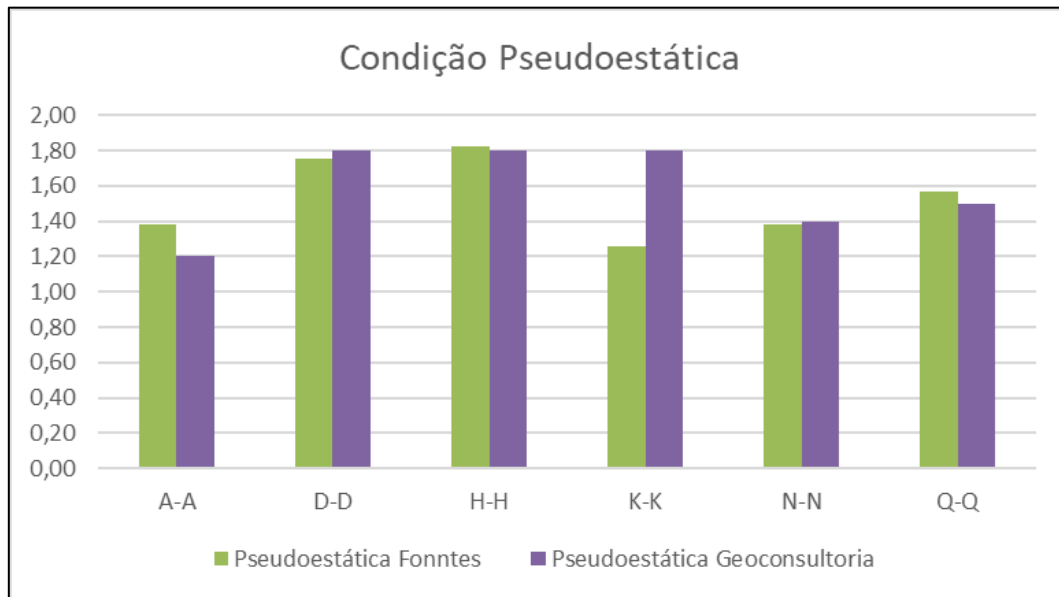
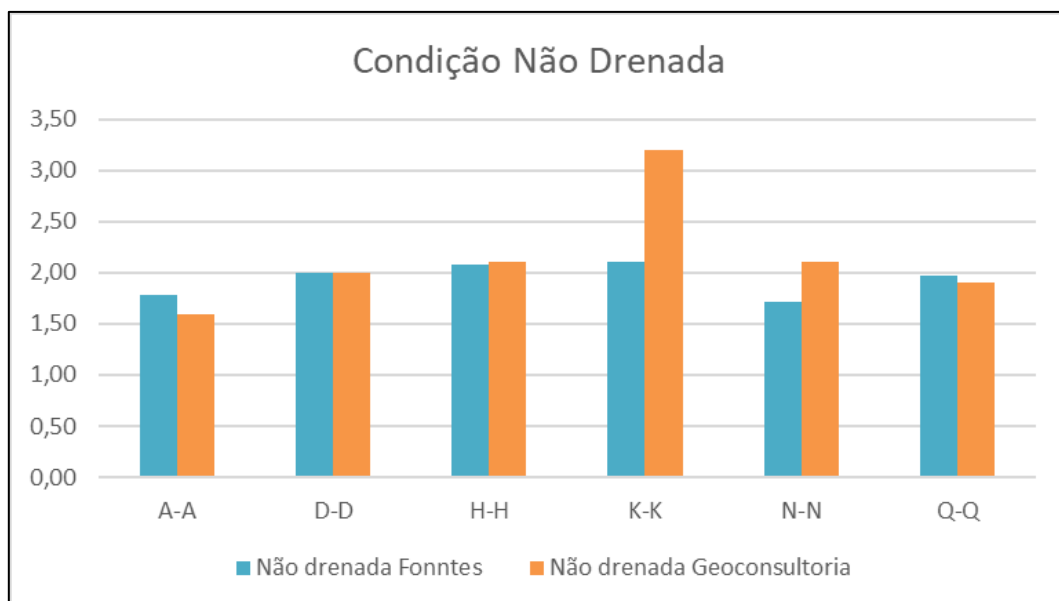
Uma comparação entre os dois estudos é apresentada na Tabela 7.11. Da Figura 7.27 a Figura 7.29 são apresentados os gráficos com a comparação para cada condição de análise. Todos os fatores de segurança atendem as recomendações normativas.

Verifica-se que as maiores diferenças entre os fatores de segurança foram observadas nas seções A-A e K-K, este fato está relacionado com os limites adotados nas análises. Já que a GEOCONSULTORIA limitou a busca na região mais a montante nessas duas seções. Contudo, a FONNTES realizou a busca da superfície potencial de ruptura também na região do aterro compactado, sendo que nessa região foram encontrados fatores de segurança menores. A diferença do fator de segurança encontrado nas análises das seções A-A e K-K justifica-se pelo domínio do modelo e método de busca das superfícies críticas de ruptura. De forma abrangente durante essa auditoria a FONNTES avaliou a estabilidade das seções tanto na região do reservatório, superfície do resíduo, como no maciço do dique de contorno. Nesse caso, os fatores de segurança encontrados atenderam aos valores mínimos considerados na norma adotada como referência.

ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO DRS1
Tabela 7.11 – Comparação entre os fatores de segurança calculados pela FONNTES e o estudo mais recente disponível.

SEÇÃO	FATORES DE SEGURANÇA OBTIDOS					
	CONDIÇÃO ESTÁTICA		CONDIÇÃO PSEUDOESTÁTICA		CONDIÇÃO NÃO DRENADA DE PICO	
	FONNTES (2022)	GEO CONSULTORIA (2022)	FONNTES (2022)	GEO CONSULTORIA (2022)	FONNTES (2022)	GEO CONSULTORIA (2022)
A-A	1,88	3,10	1,38	1,20	1,78	1,60
D-D	2,00	2,00	1,75	1,80	2,00	2,00
H-H	2,08	2,10	1,82	1,80	2,08	2,10
K-K	2,11	4,10	1,26	1,80	2,46	3,20
N-N	1,71	3,00	1,38	1,40	1,71	2,10
Q-Q	2,22	2,20	1,57	1,50	1,97	1,90


Figura 7.27 – Comparação dos fatores de segurança na condição estática.

ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO DRS1

Figura 7.28 – Comparação dos fatores de segurança na condição pseudoestática

Figura 7.29 – Comparação dos fatores de segurança na condição não drenada

7.3.6 Comparação dos Fatores de Segurança Calculados com as Recomendações Normativas

Em relação a análise de estabilidade do DRS1, utilizando-se como referência os fatores de segurança mínimos descritos na Tabela 7.9, este item realiza a comparação dos

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO DRS1		

fatores de segurança com as normas em vigor a partir de estudos de estabilidade já conduzidos por outros auditores, assim como a partir dos modelos matemáticos de cálculo dos fatores de segurança recalculados pela FONNTES.

A partir dos fatores de segurança obtidos, conforme resumo apresentado na Tabela 7.12 e gráficos da Figura 7.30 a Figura 7.32, é possível concluir que para todas as condições estudadas do DRS1, se atingiu níveis de segurança satisfatórios, indicando condições favoráveis de estabilidade do maciço.

Tabela 7.12 – Comparação entre os fatores de segurança obtidos para o DRS1 e os mínimos estipulados por norma

SEÇÃO	FATOR DE SEGURANÇA OBTIDO		
	CONDIÇÃO ESTÁTICA FS mín = 1,50 ¹	CONDIÇÃO PSEUDOESTÁTICA FS mín = 1,10 ¹	CONDIÇÃO NÃO DRENADA DE PICO FS mín = 1,30 ²
A-A	1,88	1,38	1,78
D-D	2,00	1,75	2,00
H-H	2,08	1,82	2,08
K-K	2,11	1,26	2,46
N-N	1,71	1,38	1,71
Q-Q	2,22	1,57	1,97

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

Nota 2: De acordo com Resolução nº 95, de 7 de fevereiro de 2022 (sugestão do auditor a partir do princípio da precaução, pelo fato da Hydro estar sob jurisdição da SEMAS).

ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO DRS1

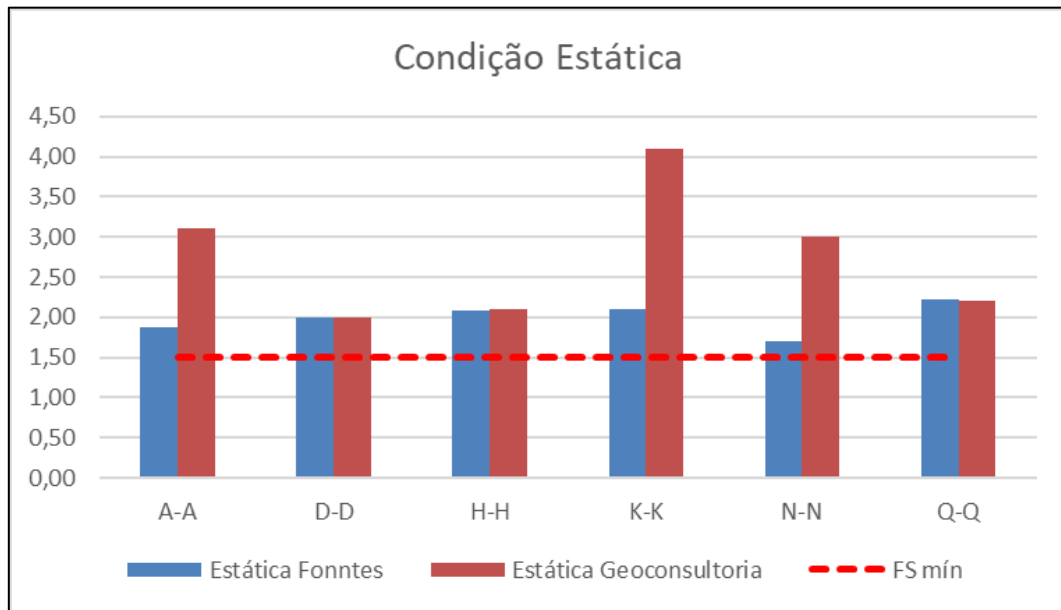


Figura 7.30 – Comparação dos fatores de segurança na condição estática e recomendações da ABNT NBR 13.028/2017

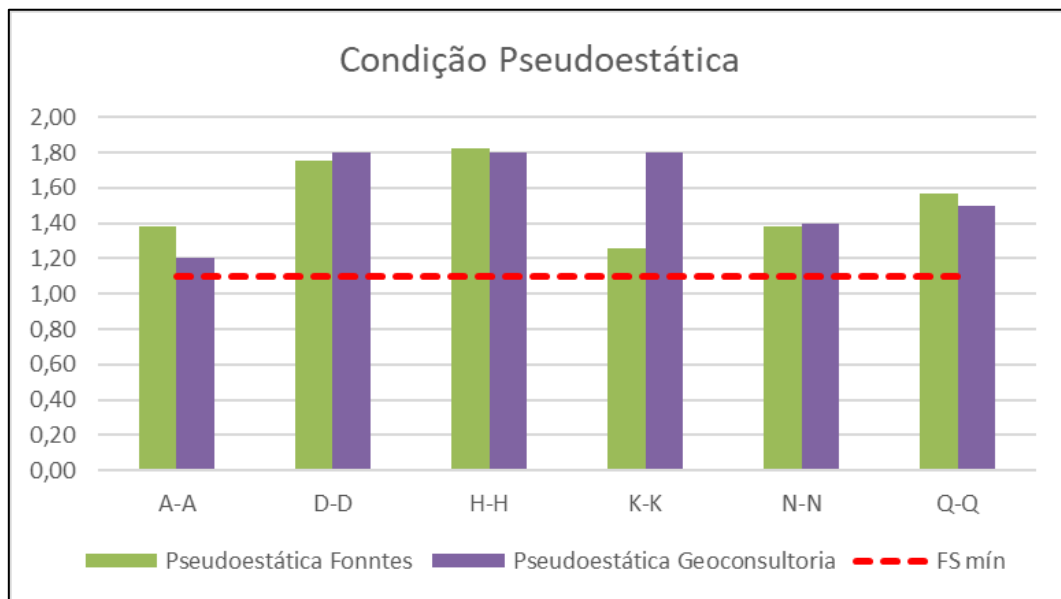


Figura 7.31 – Comparação dos fatores de segurança na condição pseudoestática e recomendações da ABNT NBR 13.028/2017

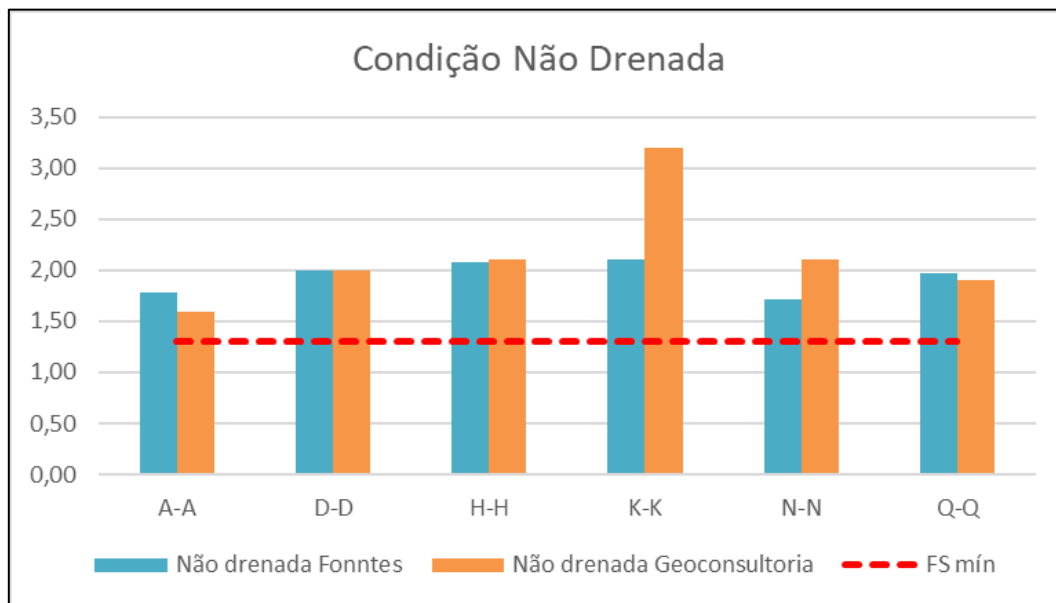
ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO DRS1


Figura 7.32 – Comparação dos fatores de segurança na condição não drenada e Resolução N° 95, DE 7 de Fevereiro de 2022.

8. CONCLUSÕES

Inicialmente, foi realizada uma avaliação dos parâmetros de resistência modelados para os materiais no último relatório de auditoria elaborado pela GEOCONSULTORIA (Doc. RT-469137-54-G-0003-rev01). Alguns pontos nos parâmetros foram identificados, o que resultou em uma atualização do relatório e emissão do documento revisado pela GEOCONSULTORIA em 22/06/2022 (Doc. RT-469137-54-G-0003-rev02). Com o documento atualizado e parâmetros de resistência dos materiais verificados, foi dado prosseguimento para os serviços de modelagem das seções.

Os modelos geológico-geotécnicos foram realizados a partir de seções de controle, tradicionalmente utilizadas para essa verificação. As seções modeladas no último relatório de auditoria elaborado pela GEOCONSULTORIA foram comparadas com a geometria atualizada, obtida através da base topográfica do Depósito DRS1 atualizada em janeiro/2022 (doc. D1-8600-54-L-2316-R0), sendo necessária a revisão geométrica

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO DRS1		

da superfície dos resíduos para as seções A e D. Destaca-se que a revisão na superfície do resíduo foi pequena, relacionada a precisão do levantamento topográfico, como pode ser verificado no Item 7.3.3.

Em sequência os modelos geológico-geotécnicos das seções de avaliação foram recalculados com auxílio do software Slide 2. Os resultados foram comparados com àqueles obtidos no último relatório de auditoria (Doc. RT-469137-54-G-0003-rev02) e com a Norma ABNT NBR 13.028/2017 e na Resolução Nº 95, DE 7 de fevereiro de 2022.

Os cálculos realizados pela FONNTES e pela GEOCONSULTORIA resultaram em valores similares de fatores de segurança na maioria das seções, sendo que todos atendem as recomendações normativas. Na seção A e K foram observadas divergências, geralmente os fatores de segurança calculados pela FONNTES foram menores que aqueles calculados pela GEOCONSULTORIA. Esse fato está relacionado com os limites adotados nas análises (a FONNTES verificou tanto a região do reservatório, superfície do resíduo e maciço do dique de contorno). O modelo matemático elaborado pela GEOCONSULTORIA limitou a busca na região mais a montante (sobre os resíduos), nessas duas seções. Contudo, a FONNTES realizou a busca da superfície potencial de ruptura mais ampla, também na região do aterro compactado do Dique, encontrando menores fatores de segurança.

A partir dos fatores de segurança obtidos foi possível concluir que para todas as seções os cenários de simulação estudadas do DRS1 (condição estática, condição pseudoestática e condição não drenada de pico), foram obtidos fatores de segurança satisfatórios, ou seja, superiores aos recomendados pela Norma ABNT NBR 13.028/2017 e Resolução Nº 95, DE 7 de fevereiro de 2022. Destaca-se que a verificação da Resolução Nº 95 foi uma sugestão do auditor considerando o princípio da precaução, ou seja, a normativa mais restritiva, especialmente pelo fato da Hydro estar sob jurisdição da SEMAS e não da ANM.

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO DRS1		

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- i. AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. Resolução nº 95, de 7 de fevereiro de 2022. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-n-95-de-7-de-fevereiro-de-2022-380760962>.
- ii. ALMARAZ, U. J. S. (1977). Aspectos Geoquímicos e Ambientais dos Calcários do Formação Pirabas, Pará. Tese de Doutorado, UFRS, 272 p.
- iii. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 13.028: Mineração – Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeito, contenção de sedimentos e reservação de água. Rio de Janeiro, 2017.
- iv. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 13.029: Mineração – Elaboração e apresentação de projeto de disposição de rejeito em pilha. Rio de Janeiro, 2017.
- v. FARIAS, E.S.; NASCIMENTO, F.S., FERREIRA, M.A.A. (1992). Estágio de Campo III: relatório final. Área Belém - Outeiro. Belém: Centro de Geociências. Universidade Federal do Pará. 247 p.
- vi. GERSCOVICH, Denise MS. Estabilidade de Taludes (2ª edição). Oficina de textos, 2016.
- vii. HAQ, B.V.; HARDENBOL, J.; VAIL, P.R. (1987). Chronology of Fluctuating Sea Levels Since the Triassic (250 million years ago to present). Science, 235: 1156-1167 p.
- viii. IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Barcarena/PA. População. 2010. Disponível em <[IBGE | Cidades@ | Pará | Barcarena | Panorama](#)>
- ix. _____. Barcarena/PA. Educação. 2010b. Disponível em <[IBGE | Cidades@ | Pará | Barcarena | Panorama](#)>
- x. _____. Barcarena/PA. Economia. 2019. Disponível em <[IBGE | Cidades@ | Pará | Barcarena | Panorama](#)>

ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO DRS1

- xi. _____. Barcarena/PA. Trabalho e Rendimento. 2020. Disponível em <[IBGE | Cidades@ | Pará | Barcarena | Panorama](#)>
- xii. _____. Barcarena/PA. Território e ambiente. 2021. Disponível em <[IBGE | Cidades@ | Pará | Barcarena | Panorama](#)>
- xiii. MABESOONE, J. M. e CASTRO, C. (1975). Desenvolvimento Geomorfológico do Nordeste Brasileiro. Boletim do Núcleo Nordeste da SBG, Recife, v.3, p. 05- 35.
- xiv. NEWMARK, Nathan M.; HALL, William J. Earthquake spectra and design. Engineering Monographs on Earthquake Criteria, 1982.
- xv. ROSSETTI D.F. & VALERIANO M.M. 2007. Evolution of the lowest Amazon basin modeled from the integration of geological and SRTM topographic data. Catena, 70:253-265.
- xvi. SARMA, S. K.; SCORER, M. The effect of vertical accelerations on seismic slope stability. In: Proceedings of the international conference on performance-based design in earthquake geotechnical engineering. Taylor and Francis Group, London. 2009. p. 889-896.



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