

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 avaliação dos aspectos estruturais do Depósito de Resíduos Sólidos DRS2, a concepção geral do projeto, o arranjo e dimensionamento das estruturas, além de suas funcionalidades, em atendimento à letra “C” do Termo de Compromisso de Ajustamento de Conduta, celebrado entre a HYDRO, ALUNORTE e o Ministério Público do Estado do Pará (MPPA), Ministério Público Federal (MPF), o Estado do Pará e a Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade do Estado do Pará. O DRS2 está localizado junto a produção da Alunorte, no município de Barcarena – PA.

À disposição para esclarecimentos julgados necessários,

Belo Horizonte, 03 de agosto de 2023

Atenciosamente,



Michel Fontes
DIRETOR
FONNTES GEOTÉCNICA



FONNTES
G E O T É C N I C A

FG-2201-NHB-A-BA-RT16-02

RELATÓRIO TÉCNICO DE AVALIAÇÃO DOS ASPECTOS ESTRUTURAIS NO DRS2

CLIENTE:



PROJETO:

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

BARCARENA - PA



Agosto/2023

AVALIAÇÃO DOS ASPECTOS ESTRUTURAIS NO DRS2**SUMÁRIO**

GLOSSÁRIO	1
1. INTRODUÇÃO	3
2. OBJETIVO.....	6
3. DADOS UTILIZADOS	7
4. ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO	8
5. APRESENTAÇÃO DO PROJETO DA ESTRUTURA.....	9
5.1 LOCALIZAÇÃO	11
5.2 ASPECTOS GEOLÓGICOS	16
5.2.1 <i>Geologia Regional</i>	16
5.2.2 <i>Histórico de Investigações</i>	18
5.2.3 <i>Geologia Local</i>	19
5.3 PLATAFORMA DA PILHA DE RETOMADA DO RESÍDUO E CÉLULA DE CONTINGÊNCIA.....	20
5.4 CANAIS DE CONTORNO E BACIAS DE CONTROLE (BC 201 E BC 202)	21
5.5 DIQUE DE CONTORNO.....	23
5.6 DIQUE ENTRE CANAL DE CONTENÇÃO DE SEDIMENTOS E CANAL DE ADUÇÃO DAS BACIAS DE CONTROLE	23
5.7 DIQUE EXTERNO DO CANAL DE ADUÇÃO DAS BACIAS DE CONTROLE	23
5.8 DIQUE EXTERNO DAS BACIAS DE CONTROLE (BC 201 E BC 202)	24
5.9 DIQUE DE CONTENÇÃO DA ÁREA ÚMIDA (INFRAESTRUTURA INICIAL).....	24
5.10 DIQUE CENTRAL E FINGERS (INFRAESTRUTURA INICIAL).....	25
5.11 SISTEMA DE IMPERMEABILIZAÇÃO.....	26
5.12 DRENAGEM INTERNA DA PILHA	27
5.13 INSTRUMENTAÇÃO.....	29
5.14 SISTEMA EXTRAVASOR.....	29
5.15 GALERIA DE TRANSPOSIÇÃO DO CANAL DE ADUÇÃO	31
5.16 DRENAGEM SUPERFICIAL	31
5.17 PROJETO <i>AS BUILT</i>	31
6. METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO	32
7. DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO.....	33
7.1 MÉTODOS DE DISPOSIÇÃO	33
7.1.1 <i>Disposição convencional</i>	35

AVALIAÇÃO DOS ASPECTOS ESTRUTURAIS NO DRS2

7.1.2	<i>Empilhamento Drenado</i>	37
7.1.3	<i>Disposição Subaérea</i>	38
7.1.4	<i>Rejeito Espessado e em Pasta</i>	38
7.1.5	<i>Empilhamento de Rejeito Filtrado (dry stacking)</i>	39
7.2	FILTRAGEM DE REJEITOS	41
7.3	CONCEITO DE DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS NO DRS2	45
8.	CONCLUSÕES	50
9.	REFERÊNCIAS	52

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
AVALIAÇÃO DOS ASPECTOS ESTRUTURAIS NO DRS2		

GLOSSÁRIO

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

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
AVALIAÇÃO DOS ASPECTOS ESTRUTURAIS NO DRS2		

- 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 ASPECTOS ESTRUTURAIS NO DRS2		

IC n° 001/2018 - MP (SIMP n°000654 -710/2018) MPPA, Inquérito Civil n° 000980 - 040/2018 (Portaria no 12/2018) MPPA, Inquérito Civil no 1.23.000.000498/2018 - 98 MPF.

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

- a) Compatibilidade do projeto executivo dos depósitos (DRS1 e DRS2) com a sua efetiva execução;
- b) Compatibilidade dos Depósitos de Resíduos Sólidos (DRS1 e DRS2) com a Lei Nacional de Segurança de Barragens (Lei 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 ASPECTOS ESTRUTURAIS NO DRS2

- consequente produção dos rejeitos, levando em consideração as condições ambientais locais;
- g) Verificação da densidade e teor de umidade ótimo (período chuvoso e período seco) e suas variações, envolvendo valor médio e desvio padrão durante a fase de testes;
 - h) Revisão dos parâmetros geotécnicos de coesão e ângulo de atrito efetivo, a partir de ensaios de laboratório e de campo, e suas variações envolvendo valor médio e desvio padrão durante a fase de testes;
 - i) Análise de estabilidade, através de parâmetros geotécnicos (programas-slope/W1 e ensaios – Laboratórios de Geotecnia), e estanqueidade. Determinação do Fator de segurança, seu valor médio e seu grau de confiabilidade, após o período de testes;
 - j) Análise de estabilidade dos depósitos, utilizando-se como referência os fatores de segurança mínimos descritos na Norma ABNT NBR 13.028/2017, e Norma ABNT NBR 13029/2017
 - k) Revisão do projeto e disposição de drenos, filtros, medidores de vazão e seus processos executivos;
 - l) Revisão do Projeto de revestimento e monitoramento dos taludes;
 - m) Verificação do teor de umidade do material que condicionará a decisão de lançá-lo na área úmida ou aplicá-lo na área seca e suas variações ao longo do período de testes;
 - n) Interpretação dos resultados dos testes relativos à aplicação do material sobre as geomembranas;
 - o) Interpretação dos ensaios destrutivos e não destrutivos para verificação da estanqueidade da Geomembrana;
 - p) Análise e adequação da suficiência do Plano de Ação Emergencial, o qual deverá contemplar a identificação e análise das possíveis/situações de emergência; os procedimentos para identificação e notificação de mau funcionamento ou de condições potenciais de ruptura dos depósitos; os procedimentos preventivos e

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
AVALIAÇÃO DOS ASPECTOS ESTRUTURAIS NO DRS2		

corretivos a serem adotados em situações de emergência, com indicação do responsável pela ação; a estratégia e meio de divulgação e alerta para as comunidades potencialmente afetadas em situação de emergência, utilizando-se como referência a Instrução Normativa nº02/2018, publicada no DOE nº 33.554, de 07 de fevereiro de 2018 e conforme estabelecido no Art. 12 da Lei nº 12.334 de 20 de setembro de 2010.

Nesse contexto, o presente relatório apresenta os estudos realizados para atendimento do item **c)**, referido aos aspectos estruturais do DRS2, a concepção geral do projeto, o arranjo e dimensionamento das estruturas, além de suas funcionalidades à avaliação do teor de umidade do material a ser lançado no DRS2.

2. OBJETIVO

Em atendimento ao termo de compromisso de ajustamento de conduta, Inquérito Civil - IC nº 001/2018 - MP (SIMP nº000654 -710/2018) MPPA, Inquérito Civil nº 000980 - 040/2018 (Portaria no 12/2018) MPPA, Inquérito Civil no 1.23.000.000498/2018 - 98 MPF, o presente documento abordará o item **“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;”** para o depósito de rejeitos DRS2.

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

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
AVALIAÇÃO DOS ASPECTOS ESTRUTURAIS NO DRS2		

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 C)**, objeto desse relatório.

Este item se concentra na “concepção geral do projeto”, pois os dimensionamentos e funcionalidades já serão mais bem detalhados no Item A). Será considerado a pertinência das soluções implementadas, tendo como partida as tecnologias disponíveis no mercado para questão de estocagem de resíduos industriais. Se a concepção, ou seja, o conceito geral projetado, está alinhamento a boas práticas e critérios consagrados de engenharia. Nesse sentido, pode ser realizada uma comparação da tecnologia e conceito geral do projeto utilizado para construção dos DRS1 e DRS2 com outras tecnológicas disponíveis, apresentado suas vantagens e desvantagens e aplicabilidade para realidade local.

3. DADOS UTILIZADOS

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

Tabela 3.1 – Documentos utilizados para elaboração desse relatório

CÓDIGO	TÍTULO DO DOCUMENTO	ELABORADO POR	DATA
RT-3540-54-G-1014 R02	Relatório Técnico do Projeto “As Is”	PIMENTA DE AVILA	29/07/21
D1-3541-54-G-102- R01	Planta geral da área do DRS2	PIMENTA DE ÁVILA CONSULTORIA LTDA	Nov/2015

AValiação DOS ASPECTOS ESTRUTURAIS NO DRS2

CÓDIGO	TÍTULO DO DOCUMENTO	ELABORADO POR	DATA
D1-3541-54-G-104- R04	Layout - Planta	PIMENTA DE ÁVILA CONSULTORIA LTDA	Nov/2015
RT-3541-54-G-360 R01	“Como Construído” do sistema de disposição de resíduos DRS2 – Fase 1	PIMENTA DE ÁVILA CONSULTORIA LTDA	Jul/2018
SP/P7388/R0519- 2018	Relatórios de caracterização do resíduo de filtros prensa conforme NBR ABNT 10.004	GEOKLOCK	2019
RT-3500-54-G-220- R00-	NOTA TÉCNICA OPERAÇÕES FILTRO TAMBOR e FILTRO PRENSA	HYDRO	Mai/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, 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;

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
AVALIAÇÃO DOS ASPECTOS ESTRUTURAIS NO DRS2		

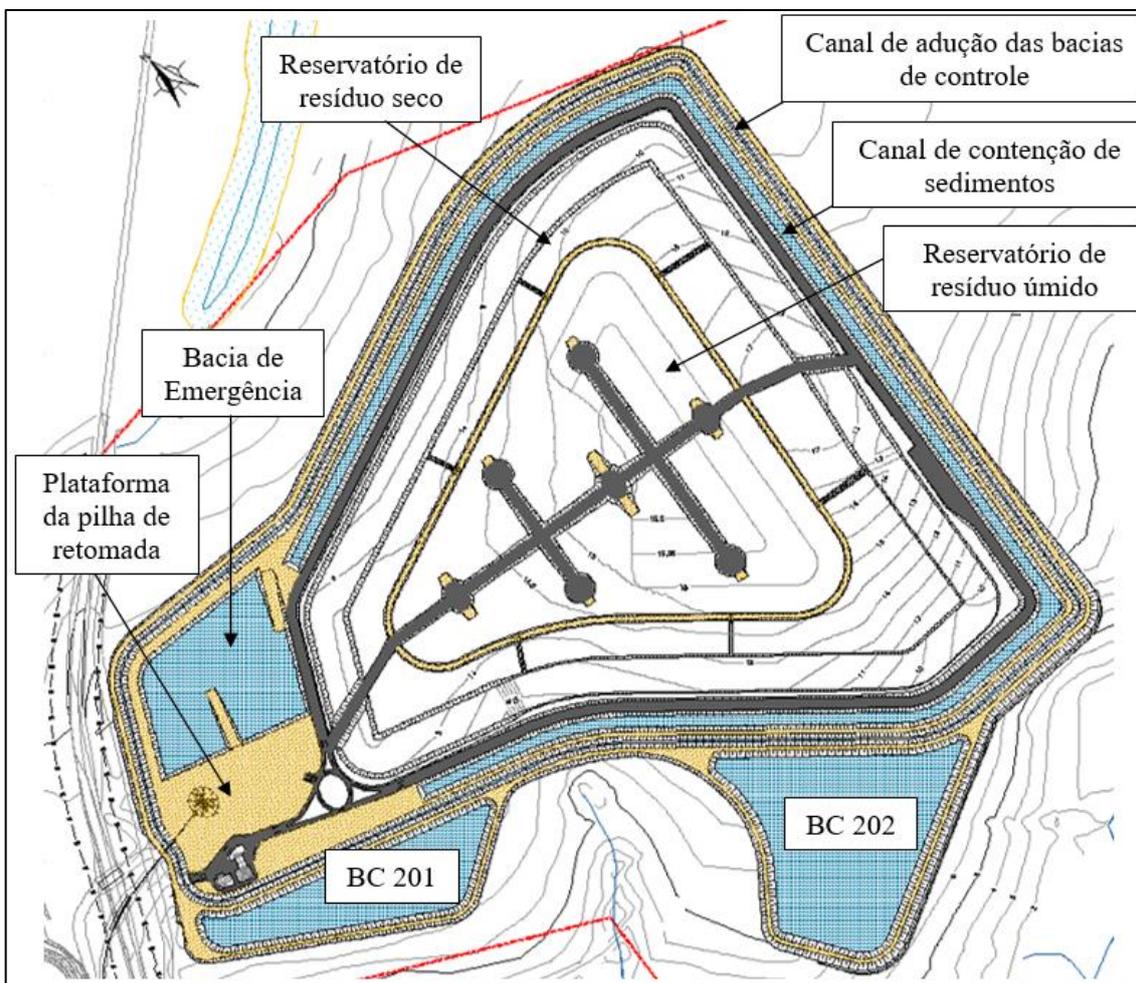
- Apresentação da estrutura em estudo, nivelando o conhecimento básico do leitor sobre o tema;
- Metodologia de avaliação da letra relativa ao presente relatório;
- Desenvolvimento dos estudos relativos à letra do presente relatório;
- Considerações finais;
- Referências bibliográficas.

5. APRESENTAÇÃO DO PROJETO DA ESTRUTURA

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

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

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

AVALIAÇÃO DOS ASPECTOS ESTRUTURAIS NO DRS2

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

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

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
AVALIAÇÃO DOS ASPECTOS ESTRUTURAIS NO DRS2		

5.1 LOCALIZAÇÃO

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

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

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

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

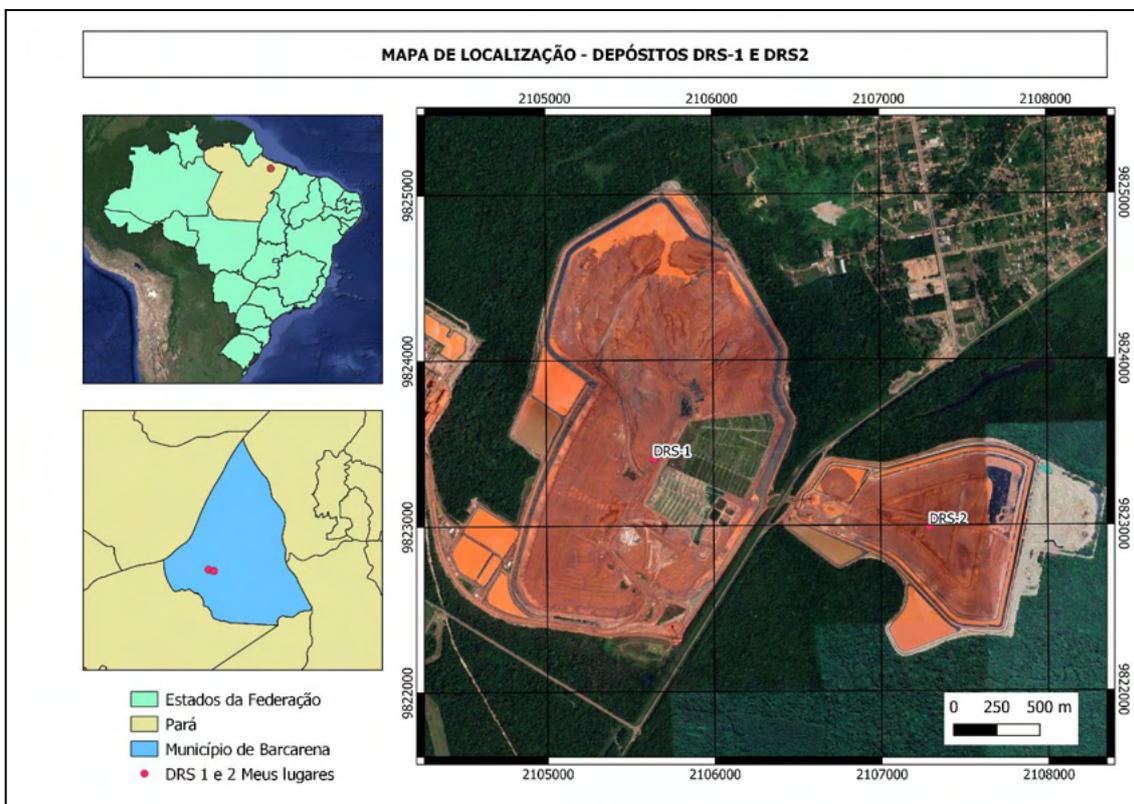
AVALIAÇÃO DOS ASPECTOS ESTRUTURAIS NO DRS2


Figura 5.2 – Localização da Estrutura – DRS1 e DRS2

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

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

Segundo o levantamento censitário realizado pelo IBGE (2010), o município de Barcarena possui 99.859 habitantes, apresentando densidade demográfica de 76,21 habitantes por quilômetro quadrado. Conforme Figura 5.3, identificam-se as comunidades Água Verde, Cabeceira Grande, Caravelas 1, Caravelas 2 Jardim das Palmeiras, Laranjal, Massarapó, Nazaré, Nestor Campos e Vila São Francisco.

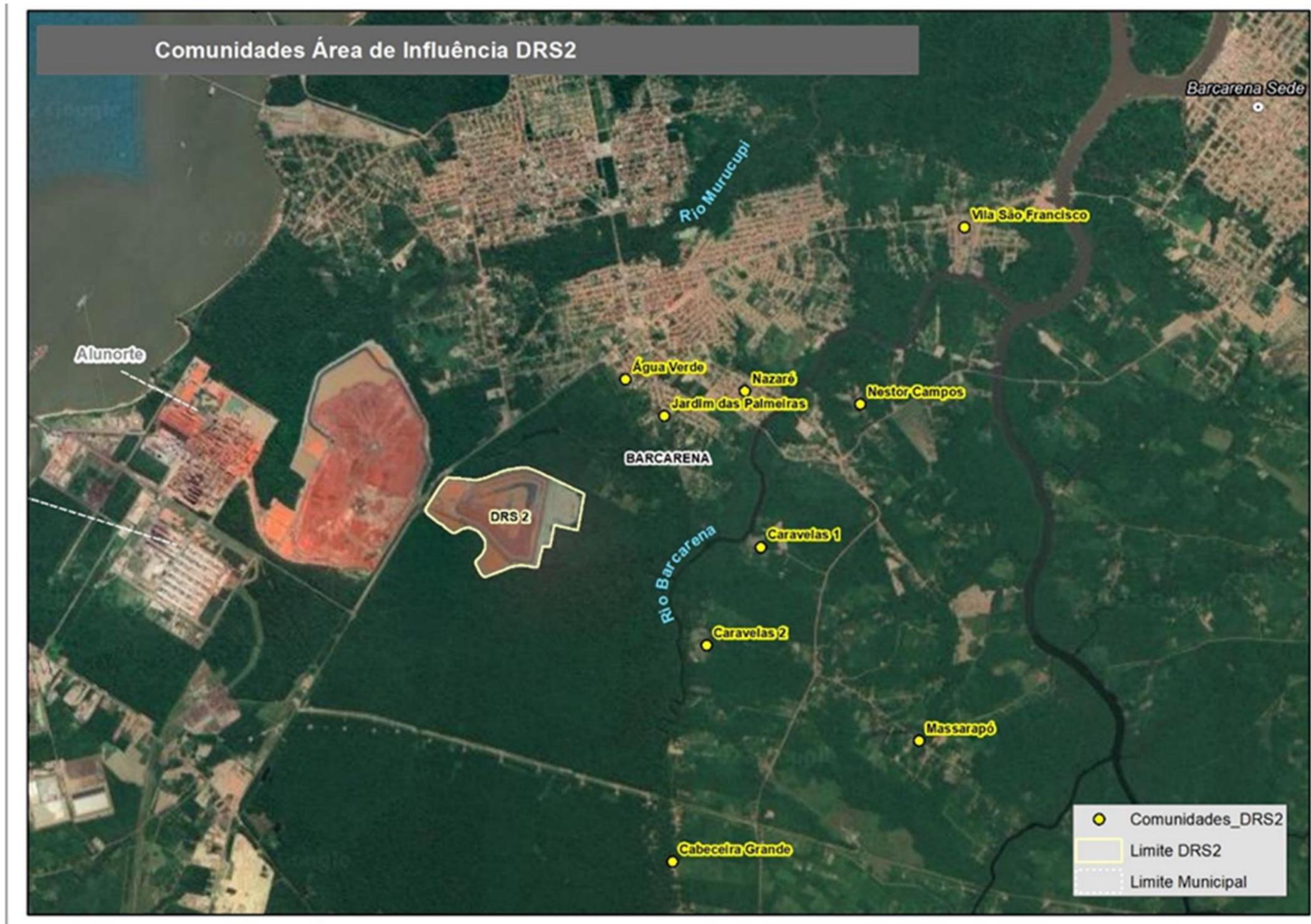


Figura 5.3 – Localização das comunidades próximas ao depósito DRS2 (Imagem fornecida pela equipe técnica da HYDRO/ALUNORTE)

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
AVALIAÇÃO DOS ASPECTOS ESTRUTURAIS NO DRS2		

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 ASPECTOS ESTRUTURAIS NO DRS2

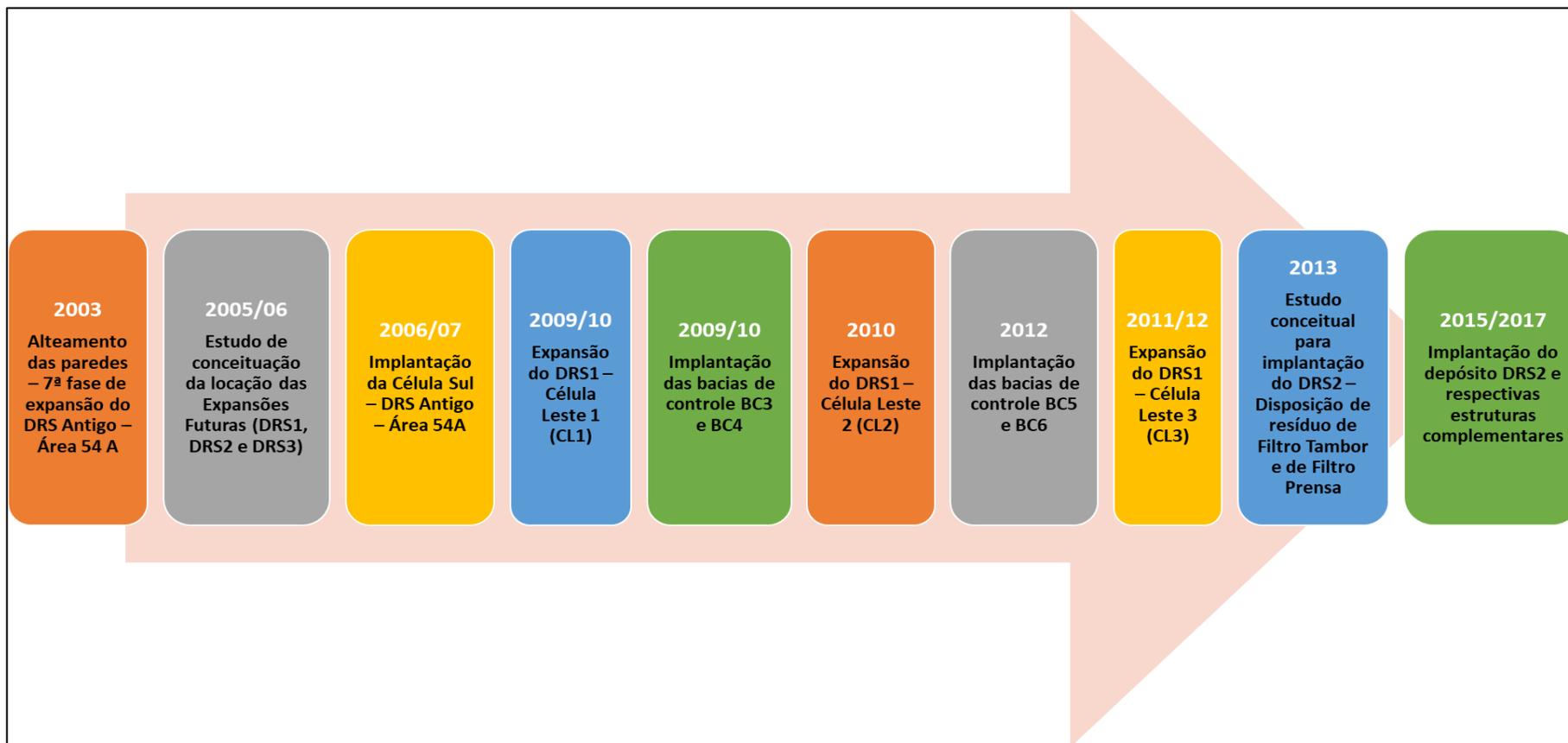


Figura 5.4 – Histórico de expansão do DRS1 e DRS2

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
AVALIAÇÃO DOS ASPECTOS ESTRUTURAIS NO DRS2		

A descrição das estruturas do DRS2 é apresentada a seguir com base no memorial descritivo do projeto (MD-3541-54-G-096) e relatório As Built (RT-3541-54-G-360 R01_AN-561-RL-47252-00).

5.2 ASPECTOS GEOLÓGICOS

5.2.1 Geologia Regional

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

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

Ocupando uma área de aproximadamente 12.000 m², que se estende à faixa litorânea entre as cidades de Bragança e Belém avançando para o interior do Pará, a Formação Pirabas ocorre sobreposta ao embasamento cristalino (Almaraz, 1977) e é caracterizada pela composição calcária e conteúdo fossilífero. A deposição se fez por evento transgressivo decorrente da subida do nível do mar em todo o planeta, durante o Mioceno (Haq et al. 1987). Sucedendo ao evento transgressivo que resultou na Formação Pirabas, ocorreu um evento de caráter regressivo o qual foi responsável pela sedimentação do Grupo Barreiras.

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

AVALIAÇÃO DOS ASPECTOS ESTRUTURAIS NO DRS2

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

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

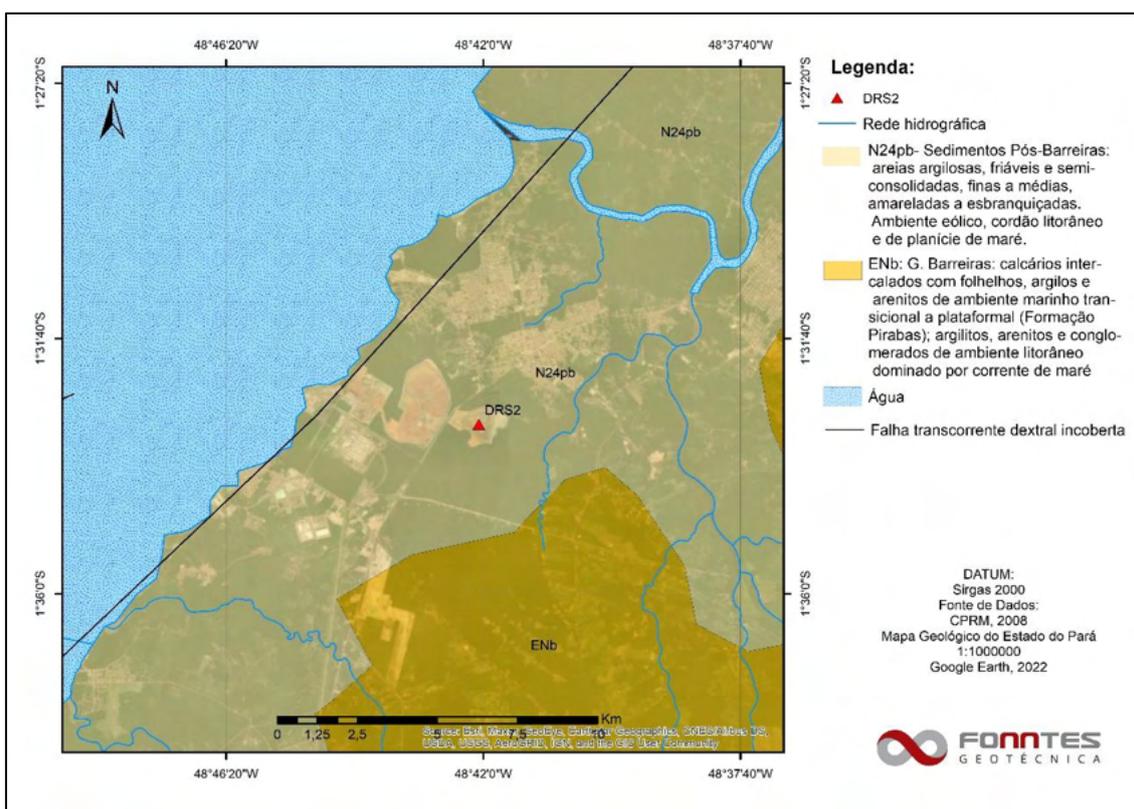


Figura 5.5 – Mapa geológico regional da estrutura DRS2

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

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
AVALIAÇÃO DOS ASPECTOS ESTRUTURAIS NO DRS2		

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

5.2.2 Histórico de Investigações

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

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

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

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

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

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
AVALIAÇÃO DOS ASPECTOS ESTRUTURAIS NO DRS2		

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

5.2.3 Geologia Local

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

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

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

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

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

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

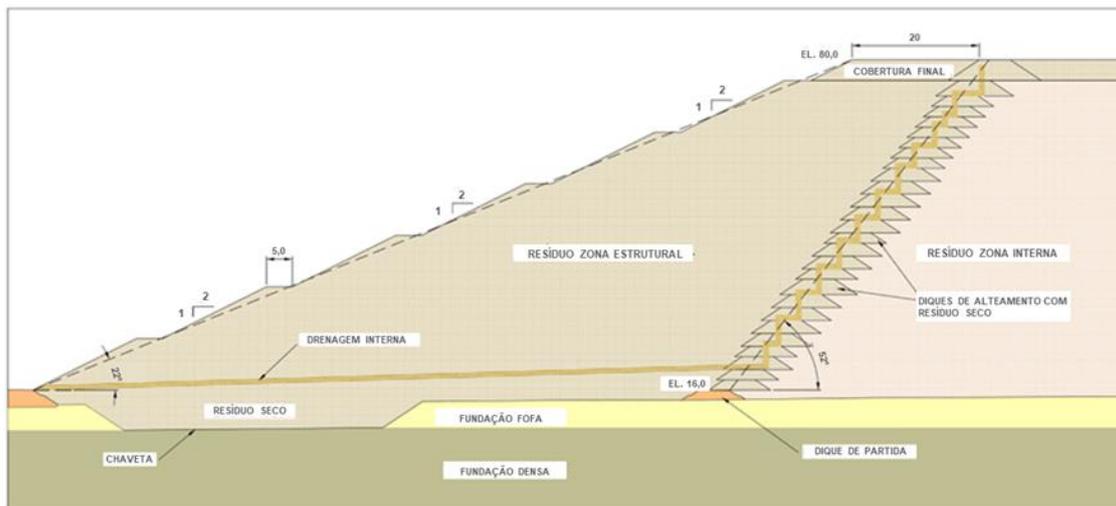
AVALIAÇÃO DOS ASPECTOS ESTRUTURAIS NO DRS2


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

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

A plataforma da pilha de retomada de resíduo para disposição no DRS2 foi projetada na El. 16,0 m, com área em planta de cerca de 49.900 m².

A Célula de Contingência foi projetada para receber resíduo em condições de umidade extremamente elevadas. Tendo em vista que elevada umidade impossibilitaria a sua disposição por meio de espalhamento com trator de esteiras. Foi prevista crista na El. 16,0 m e fundo com elevação variável em torno da EL. 11,0 m, área em planta de cerca de 48.500 m², taludes de montante com inclinação 1V:1,5H e volume de armazenamento de aproximadamente 199.483 m³ de resíduo “super úmido”. A Célula de Contingência é apresentada na Figura 5.7.

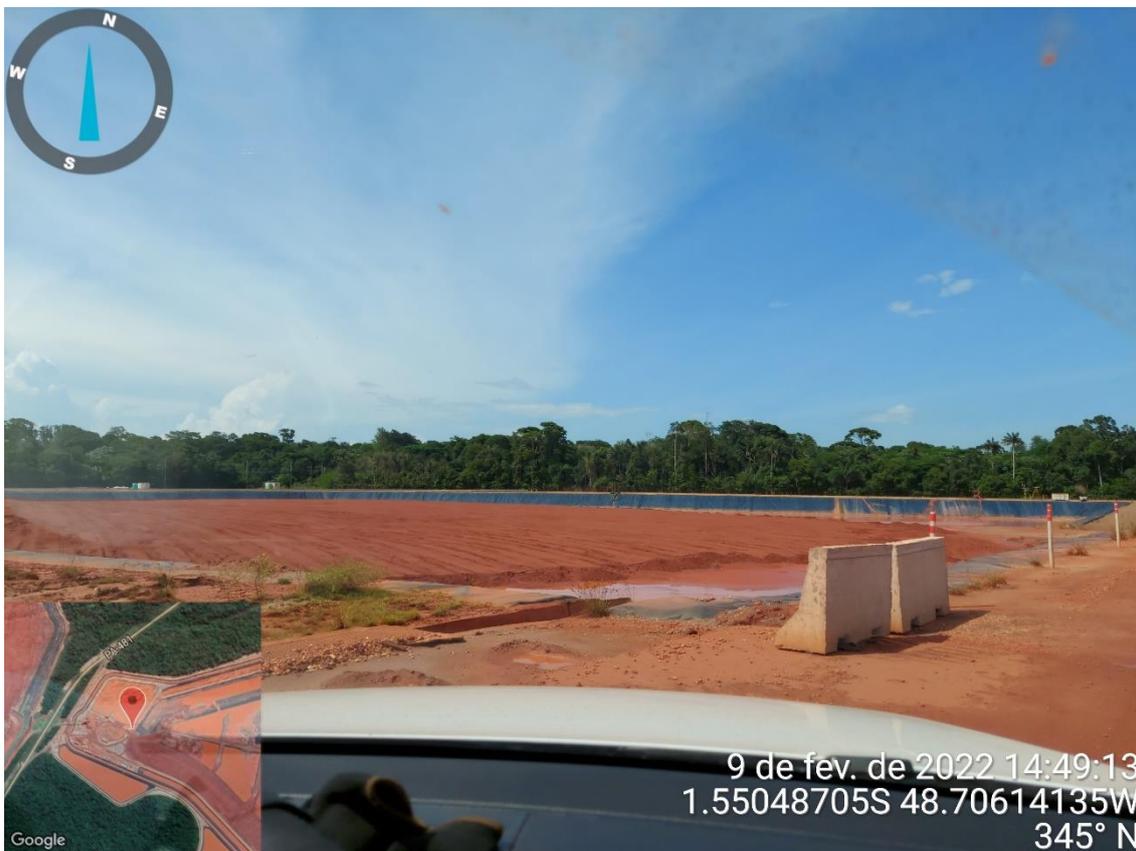


Figura 5.7 – Célula de Contingência

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

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

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

O canal implantado adjacente ao reservatório de resíduos, denominado canal de contenção de sedimentos, apresenta cerca de 15m de largura da base, taludes com inclinação de 1V:1,5H, e fundo na elevação 11,0m (Figura 5.8). Tem como objetivo conter os sedimentos provenientes da drenagem da pilha, que porventura sejam carreados para o canal.



Figura 5.8 – Canal de contorno adjacente ao DRS2

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

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

AVALIAÇÃO DOS ASPECTOS ESTRUTURAIS NO DRS2

A bacia de controle BC 201 tem uma área de cerca de 34.585 m² de fundo, taludes 1V:1,5H, crista na elevação 15,50 m e fundo na elevação 9,00 m. Possui um volume total de 258.129 m³. Já a BC 202 tem uma área de cerca de 65.301 m² de fundo, taludes 1V:1,5H, crista na elevação 15,50 m e fundo na elevação 9,00 m, perfazendo um volume total de 463.201 m³.

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

5.5 DIQUE DE CONTORNO

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

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

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

5.7 DIQUE EXTERNO DO CANAL DE ADUÇÃO DAS BACIAS DE CONTROLE

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



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

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

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

5.9 DIQUE DE CONTENÇÃO DA ÁREA ÚMIDA (INFRAESTRUTURA INICIAL)

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

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
AVALIAÇÃO DOS ASPECTOS ESTRUTURAIS NO DRS2		

5.10 DIQUE CENTRAL E FINGERS (INFRAESTRUTURA INICIAL)

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

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

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



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

5.11 SISTEMA DE IMPERMEABILIZAÇÃO

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

Para proteção da geomembrana quanto ao puncionamento por qualquer material pontiagudo que possa existir nas áreas de aterro e de terreno natural que ela cobrirá, nos taludes foi instalado, sob a geomembrana, geotêxtil não tecido de gramatura igual a 400g/m² e, no fundo do reservatório, das bacias e do canal de contenção de sedimentos, a geomembrana estará sobre uma camada de 7,0 cm de areia.

AVALIAÇÃO DOS ASPECTOS ESTRUTURAIS NO DRS2

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

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

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

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

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

5.12 DRENAGEM INTERNA DA PILHA

Segundo o memorial descritivo, o sistema de drenagem interna foi previsto ser implantado quando a pilha de resíduo atingir a elevação 16 m, ou seja, a borda do dique de contorno. Consiste em drenos transversais, espaçados de 10 m entre si, de seção retangular de 0,60 m por 0,40 m de seixo rolado, envolto por geotêxtil e uma camada

AVALIAÇÃO DOS ASPECTOS ESTRUTURAIS NO DRS2

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

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

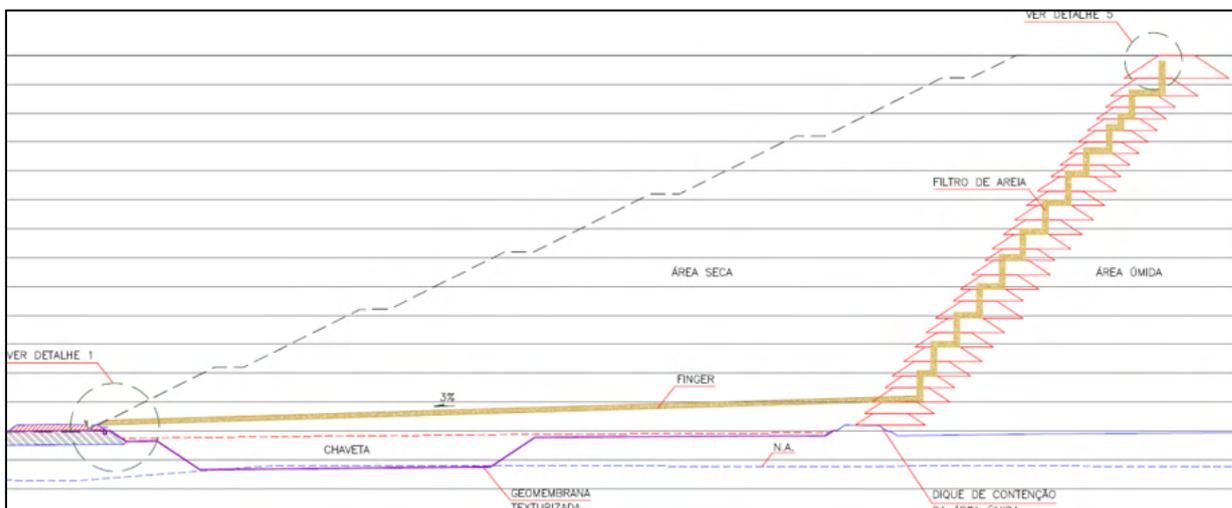


Figura 5.11 – Seção Típica – Drenagem interna da pilha (documento D1-3541-54-G-163)

AVALIAÇÃO DOS ASPECTOS ESTRUTURAIS NO DRS2

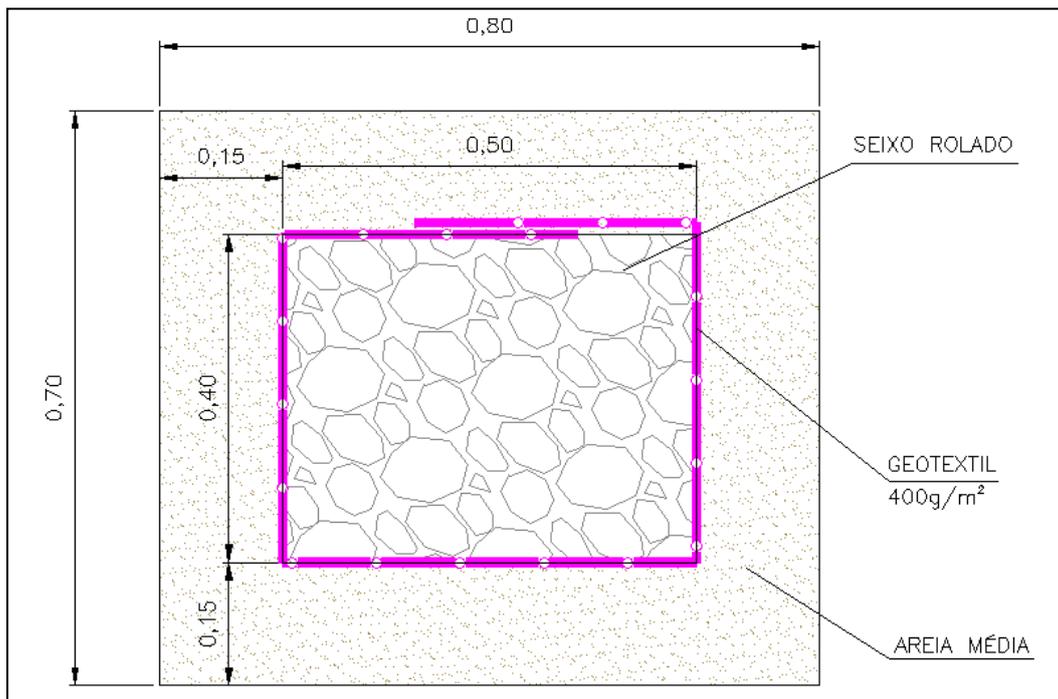


Figura 5.12 – Detalhe Típico – Drenos (D1-3541-54-G-163)

5.13 INSTRUMENTAÇÃO

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

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

5.14 SISTEMA EXTRAVASOR

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

AVALIAÇÃO DOS ASPECTOS ESTRUTURAIS NO DRS2

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

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

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

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

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

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

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

5.15 GALERIA DE TRANSPOSIÇÃO DO CANAL DE ADUÇÃO

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

5.16 DRENAGEM SUPERFICIAL

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

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

5.17 PROJETO AS BUILT

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

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

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
AVALIAÇÃO DOS ASPECTOS ESTRUTURAIS NO DRS2		

- Execução de camada de geotêxtil e tapete de areia sob a geomembrana.

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

6. METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO

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

A metodologia de avaliação do presente item do TAC 3.1, letra C), se concentra na “concepção geral do projeto”, pois os dimensionamentos e funcionalidades já serão melhor detalhados no Item A). Neste sentido, será avaliada a pertinência das soluções implementadas no âmbito do DRS2, tendo como partida as tecnologias disponíveis no mercado para questão de estocagem de resíduos industriais.

AVALIAÇÃO DOS ASPECTOS ESTRUTURAIS NO DRS2

Também será avaliado se a concepção, ou o conceito geral projetado, está alinhado a boas práticas e critérios consagrados de engenharia. Nesse sentido, pode ser realizada uma comparação entre a tecnologia utilizada para o conceito de disposição de resíduos adotado no projeto do DRS2 com outras tecnologias disponíveis, apresentado suas vantagens e desvantagens e aplicabilidade para realidade local.

7. DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO

O estudo a seguir trata-se de uma revisão bibliográfica, cujo objeto é apresentar de maneira sucinta os tipos de tecnologia disponíveis atualmente para disposição de rejeitos, a fim de contextualizar sobre as possíveis soluções disponíveis em relação àquela adotada pela ALUNORTE (item 7.1.5). A sequência de apresentação considera também o nível tecnológico da solução, iniciando pelas mais simples até as de maior robustez.

7.1 MÉTODOS DE DISPOSIÇÃO

Os resíduos do processo de mineração ou industrial, incluindo as parcelas líquida e sólida, de modo geral não apresentam valor comercial, sendo necessário encontrar um local para dispor esse volume.

A escolha do método de disposição do rejeito depende da tecnologia utilizada no processo de beneficiamento do minério e tratamento do rejeito. Conforme Peixoto (2012), em função do teor de sólidos e consistência, os rejeitos podem ser classificados como:

- Rejeito em polpa (*slurry*): rejeito contendo baixo teor de sólidos e que apresente baixa ou nenhuma resistência ao transporte por gravidade ou via bombeamento;

AVALIAÇÃO DOS ASPECTOS ESTRUTURAIS NO DRS2

- Rejeito espessado (*thickened tailings*): rejeito parcialmente desaguado e que apresenta consistência semelhante a polpa, sendo possível o transporte por bombeamento;
- Rejeito em pasta (*paste tailings*): rejeito espessado que apresenta consistência de pasta e que não flui naturalmente e não drena grande quantidade de água quando disposto no depósito final;
- Rejeito filtrado úmido (*wet cake tailings*): rejeito com aspecto de uma massa saturada ou quase-saturada não bombeável;
- Rejeitos filtrados secos (*dry cake tailings*): resíduo com aspecto de uma massa não-saturada não bombeável, contendo grau de saturação geralmente entre 70% e 85%.

A Figura 7.1 apresenta algumas características do rejeito em função da sua classificação baseada no teor de sólidos e consistência.

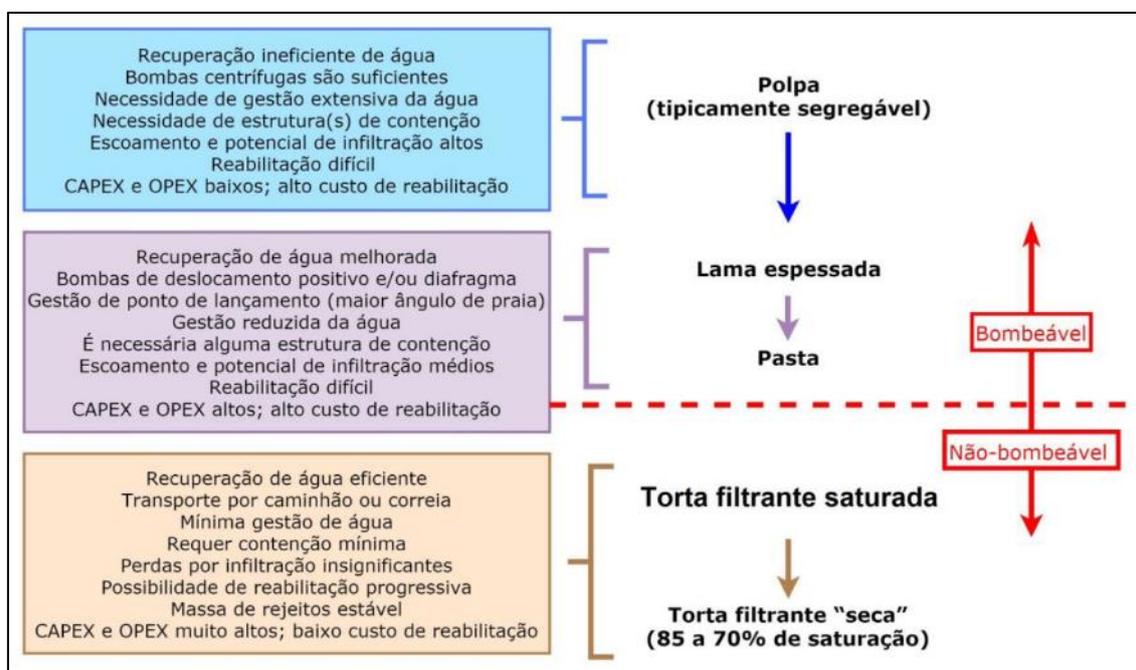


Figura 7.1 – Esquema comparativo entre formas de disposição de rejeito (Adaptado de Australia's Department of Industry, Innovation And Science, 2016) (ALVES, 2020).

AVALIAÇÃO DOS ASPECTOS ESTRUTURAIS NO DRS2

Os métodos para disposição dos rejeitos da mineração incluem:

- disposição convencional (em reservatórios, como barragens e diques);
- empilhamento drenado;
- disposição subaérea;
- rejeito espessado ou em pasta;
- empilhamento de resíduo filtrado (*dry stacking*).

7.1.1 Disposição convencional

Segundo ALVES (2020), o método de disposição mais utilizado consiste no lançamento do rejeito na forma de polpa em um reservatório delimitado por uma estrutura de contenção, denominada barragem ou dique.

A Resolução ANM nº95/2022 define barragens de mineração como: barragens, barramentos, diques, cavas com barramentos construídos, associados às atividades desenvolvidas com base em direito minerário, construídos em cota superior à da topografia original do terreno, utilizados em caráter temporário ou definitivo para fins de contenção, acumulação, decantação ou descarga de rejeitos ou de sedimentos provenientes de atividades de mineração com ou sem captação de água associada, compreendendo a estrutura do barramento e suas estruturas associadas, excluindo-se deste conceito as barragens de contenção de resíduos industriais. Também são consideradas barragens de mineração as estruturas construídas por meio de disposição hidráulica de rejeitos, como um maciço permeável, dotado de sistema de drenagem de fundo, suscetíveis à liquefação.

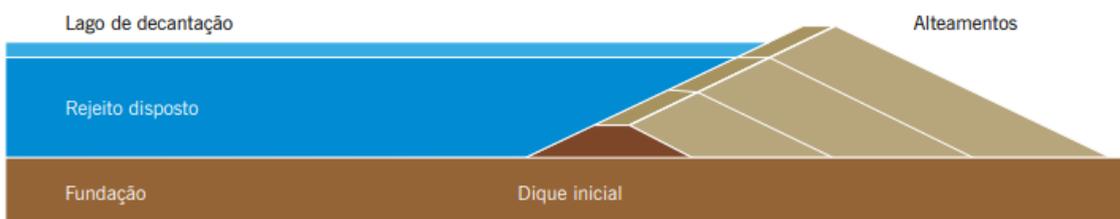
Geralmente, a construção de uma barragem se inicia com a implantação de um dique de partida e, na sequência, são realizados alteamentos sucessivos de modo a aumentar a capacidade de armazenamento da estrutura. Os métodos de alteamento de barragens são indicados na Figura 7.2 e detalhados a seguir:

AVALIAÇÃO DOS ASPECTOS ESTRUTURAIS NO DRS2

- alteamento a montante¹ – método em que os maciços de alteamento se apoiam sobre o próprio rejeito ou sedimento previamente lançado e depositado;
- alteamento a jusante – método em que os maciços de alteamento são construídos para jusante com material de empréstimo ou com o próprio rejeito;
- alteamento por linha de centro – método em que os alteamentos se dão de tal forma que o eixo da barragem se mantém alinhado com o eixo do dique de partida, em razão da disposição do material construtivo, parte a jusante e parte a montante, em relação à crista da etapa anterior.



(a) Alateamento de montante



(b) Alateamento de jusante



(c) Alateamento por linha de centro

Figura 7.2 – Métodos de alteamento de barragens de mineração (IBRAM, 2016).

¹ Atualmente esse método está proibido no Brasil, conforme Lei Federal Nº 14.066 de 30 de Setembro de 2020

7.1.2 Empilhamento Drenado

De acordo com a Resolução ANM nº95/2022, os empilhamentos drenados consistem em estrutura construída hidráulica ou mecanicamente com rejeitos, que se configura como um maciço permeável, dotado de sistema de drenagem de fundo, com formação de espelho de água reduzido podendo ser implantada em fundo de vale, encosta ou outra área. Um exemplo de empilhamento drenado pode ser observado na Figura 7.3.



Figura 7.3 – Empilhamento drenado (IBRAM, 2016).

No empilhamento drenado, é construído, inicialmente, um dique de partida e o sistema de drenagem de fundo, formado por drenos executados na fundação do reservatório. O sistema de drenagem de fundo é o que permite o padrão de fluxo gravitacional e subvertical no interior do reservatório, resultando em um depósito sem formação de excessos de poropressão, favorecendo a sua estabilidade geotécnica.

Na sequência, os rejeitos arenosos são lançados da crista do dique de partida pela técnica de aterro hidráulico. São construídos alteamentos sucessivos, geralmente pelo

		AUDITORIA DE SEGURANÇA
AVALIAÇÃO DOS ASPECTOS ESTRUTURAIS NO DRS2		

método de montante, com os rejeitos retirados da própria praia e compactados com trator de esteira.

Segundo OLIVEIRA-FILHO e ABRÃO (2015), a lagoa que pode ser observada na superfície do empilhamento drenado é decorrente praticamente apenas da acumulação de água proveniente da polpa de rejeito, sendo a contribuição de água afluyente pequena ou limitada à precipitação na área do reservatório. Deste modo, quando cessadas as operações, a lagoa acaba desaparecendo.

7.1.3 Disposição Subaérea

De acordo com LIMA (2006), na disposição subaérea ocorre a disposição do rejeito fino em camadas finas, em ciclos alternados de lançamento e espera (não lançamento), possibilitando o seu adensamento e a drenagem antes do lançamento da camada seguinte. Deste modo, obtém-se um material mais densificado, com baixas poropressões e, eventualmente, com sucção. O aumento do teor de sólidos do rejeito por conta do adensamento por peso próprio e o ressecamento do rejeito por evaporação resulta no aumento da resistência do material.

Na disposição subaérea, os rejeitos finos são dispostos sem sofrer qualquer tipo de modificação na planta. Devido à alternância entre o lançamento e a espera neste método, são necessários diferentes reservatórios em número e área suficientes para que a disposição ocorra em um deles, enquanto a drenagem e secagem está ocorrendo nos demais reservatórios.

7.1.4 Rejeito Espessado e em Pasta

Segundo PORTES (2013), a técnica de disposição de rejeitos espessados foi introduzida por Robinsky em 1968. Nesse procedimento são empregados espessadores que separam os sólidos do líquido mediante sedimentação de partículas por gravidade. Com

AVALIAÇÃO DOS ASPECTOS ESTRUTURAIS NO DRS2

isso, aumenta-se a concentração e a percentagem de sólidos em peso através do desaguamento da polpa. Em algumas situações, são utilizados alguns reagentes para que ocorra a sedimentação das partículas, como os floculantes e os coagulantes, além do controle do pH.

De acordo com GOMES (2009), os rejeitos espessados podem ser depositados tanto em áreas planas quanto em terrenos irregulares. Em áreas planas, a disposição do material tende a formar um depósito cônico com taludes uniformes e suaves. Em vales, a pasta viscosa tende a fluir e se adensar, conformando à topografia do terreno ou sendo contida por um barramento. Para acumulação e aproveitamento de água e reagentes do processo, é construído um barramento à jusante. A construção de barramentos também pode ser necessária, conforme avança o processo de disposição, de modo a aumentar a capacidade de armazenamento de rejeitos.

Entre as principais vantagens dos processos de espessamento de rejeitos estão: o grande volume de água reaproveitada em comparação às técnicas utilizadas na recuperação de água em barragens de rejeitos; a menor susceptibilidade à liquefação do material; maior densidade e estabilidade dessas estruturas; menores impactos ambientais; e maior recuperação dos reagentes utilizados nos processos de tratamento.

7.1.5 Empilhamento de Rejeito Filtrado (*dry stacking*)

Segundo PORTES (2013), a filtragem de rejeitos consiste na separação de sólidos e líquidos por meio da passagem da polpa em um meio filtrante, que é capaz de reter partículas sólidas e permitir a passagem do líquido.

Nesta técnica, os rejeitos são espessados até certa consistência, através de espessadores e, na sequência, são filtrados por meio de filtros a vácuo ou de pressão positiva. Então, a água proveniente das etapas de espessamento e filtragem pode ser reutilizada nos processos minerários. O teor de umidade do produto da filtragem,

AVALIAÇÃO DOS ASPECTOS ESTRUTURAIS NO DRS2

chamado torta filtrante (*filter cake*), é um dos fatores mais importantes para o manejo posterior desse material.

De acordo com GOMES (2009), após o processo de filtragem, os resíduos apresentam baixo teor de umidade e são transportados em caminhões ou em correias transportadoras até o local de disposição final. Neste local, os resíduos são lançados, espalhados e compactados em camadas ou estabilizados em pilhas. Apesar dos custos elevados associados à planta de desaguamento, transporte e disposição final, estes custos são amortizados na fase de desativação do empreendimento.

OLIVEIRA-FILHO e ABRÃO (2015) destacam a divisão da pilha em duas zonas para locais com a estação chuvosa bem definida. Desta forma, a disposição dos resíduos na parte mais externa do depósito é realizada durante a estação seca, executando a compactação desse material conforme especificações de aterro similares à construção de uma estrutura de contenção. Com isso, os resíduos compactados durante a estação seca, na zona estrutural, funcionam como espaldares para a contenção dos rejeitos filtrados que vierem a ser depositados na porção mais interna do depósito (zona não-estrutural) durante a estação chuvosa. Os materiais depositados na zona não-estrutural podem ser lançados e espalhados ou levemente compactados na porção mais interna da pilha de rejeitos filtrados.

Conforme indicado por ALVES (2020), podem ser aplicadas diferentes artifícios para se atingir o teor de umidade e a densidade desejados na pilha de rejeito filtrado. Uma das opções mais usuais é a disposição de finas camadas de rejeito filtrado, por correia ou caminhão, para posterior compactação, especialmente nas zonas estruturais. A disposição em camadas finas permite a evaporação pela ação de ventos e da radiação solar e a compactação proporciona o aumento da densidade e, conseqüentemente, o aumento da estabilidade geotécnica da pilha.

A Figura 7.4 indica o depósito DRS2 da ALUNORTE, observado na visita técnica de campo realizada pela FONNTES no dia 09/02/2022, que se trata de um Empilhamento de Rejeito Filtrado (*dry stacking*). Os rejeitos filtrados serão abordados no item 7.2 deste documento.



Figura 7.4 – Depósito DRS2 – Empilhamento de Rejeito Filtrado (*dry stacking*) (FONNTES, 09/02/2022)

7.2 FILTRAGEM DE REJEITOS

A filtração de rejeitos é a operação unitária de separação dos sólidos contidos em uma suspensão aquosa mediante a passagem das partículas sólidas por um meio filtrante por meio da aplicação de uma força sobre as partículas. A força pode ser proveniente da gravidade, vácuo, pressão ou centrifugação.

Na filtração à vácuo, uma pressão negativa é aplicada embaixo do meio filtrante, enquanto na filtração sobre pressão, uma pressão positiva é aplicada sobre os rejeitos. Algumas tecnologias combinam vácuo e pressão (filtração hiperbárica) e outras utilizam

AVALIAÇÃO DOS ASPECTOS ESTRUTURAIS NO DRS2

a ação de capilares de meios porosos combinados com a aplicação de vácuo (filtragem capilar) (GUIMARÃES, 2011).

Conforme apresentado por GUIMARÃES (2011), dentre as vantagens do método de disposição de resíduos ou rejeitos filtrados, destacam-se: (i) redução da área necessária para disposição; (ii) menor impacto ambiental; (iii) redução da água necessária para o processo; (iv) variedade de equipamentos que podem ser utilizados para a filtração. Dentre as desvantagens, pode-se citar, (i) custos elevados na aquisição de equipamentos; (ii) necessidade de máquinas para transporte e empilhamento dos resíduos; (iii) dependência entre a capacidade da mina e a taxa unitária de filtragem.

Alguns dos métodos mais comuns de filtragem de resíduos de mineração foram citados por (GUIMARÃES, 2011) e estão apresentados na Tabela 7.1.

Tabela 7.1– Tipos e mecanismos de filtragem de rejeitos (Adaptado de GUIMARÃES, 2011)

Tipos	Características	Modelos de filtros
Filtragem a vácuo	Criada uma pressão negativa debaixo do meio filtrante	Filtro de tambor, filtro de disco convencional, filtro horizontal de mesa, filtro horizontal de esteira
Filtragem sob pressão	Uma pressão positiva é aplicada na polpa	Filtro prensa horizontal, Filtro prensa vertical
Filtragem centrífuga	Utiliza a força centrífuga para forçar a passagem do líquido	Centrífugas verticais e Decanters
Filtragem hiperbárica	A partir da combinação de vácuo e pressão	Filtro de disco encapsulado ou hiperbárico
Filtragem capilar	Utiliza a ação de capilares de meios cerâmicos porosos para efetuar o desaguamento	Ceramec

De acordo com a Nota técnica de Operações Filtro Tambor e Filtro Prensa (RT-3500-54-G-220-R00), a tecnologia de filtragem utilizada no DRS2 é a de filtragem por meio de

AVALIAÇÃO DOS ASPECTOS ESTRUTURAIS NO DRS2

prensa, e teve início em meados de agosto de 2016, tendo sido utilizada até março de 2018. Em março de 2018 as operações foram suspensas devido a embargo das atividades de beneficiamento. As atividades foram retomadas junto da operação do filtro prensa em outubro de 2018 e permanecem até os dias atuais.

A seguir será dada ênfase na metodologia de filtração adotada atualmente para o, DRS2, o qual tem utilizado desde o início da operação o filtro prensa.

Conforme apresentado por GUIMARÃES (2011), a filtragem a pressão é caracterizada pela pressão positiva na polpa e apresenta um ciclo descontínuo, ou seja, em bateladas. Como principal vantagem apresenta um maior teor de sólidos na torta produzida e descarregada. O filtro prensa horizontal é constituído de diversas placas paralelas verticais, sendo que cada uma delas apresenta um recesso nos dois lados, formando uma câmara com as placas vizinhas. Seu ciclo pode ser dividido em três etapas: enchimento, filtragem sob pressão máxima e descarga de torta. Uma ilustração do funcionamento da filtragem a pressão no filtro prensa é apresentado na Figura 7.6. Um exemplo do filtro tambor é apresentado na Figura 7.5 e um exemplo do filtro prensa é apresentado na Figura 7.7.

AVALIAÇÃO DOS ASPECTOS ESTRUTURAIS NO DRS2

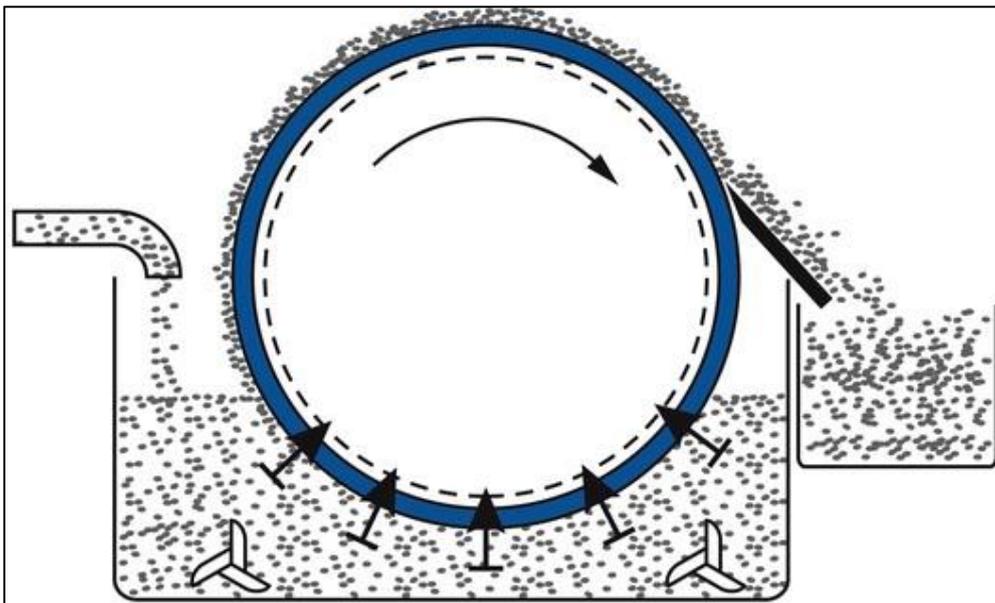


Figura 7.5 – Esquema de funcionamento do filtro tambor (imagem obtida em <https://www.sefar.com/pt/609/Processos-de-Filtra%C3%A7%C3%A3o/Quimicos/Filtros-de-tambor-rotativo/Filtros-de-Tambor-Rotativo.htm?Folder=6923458>)

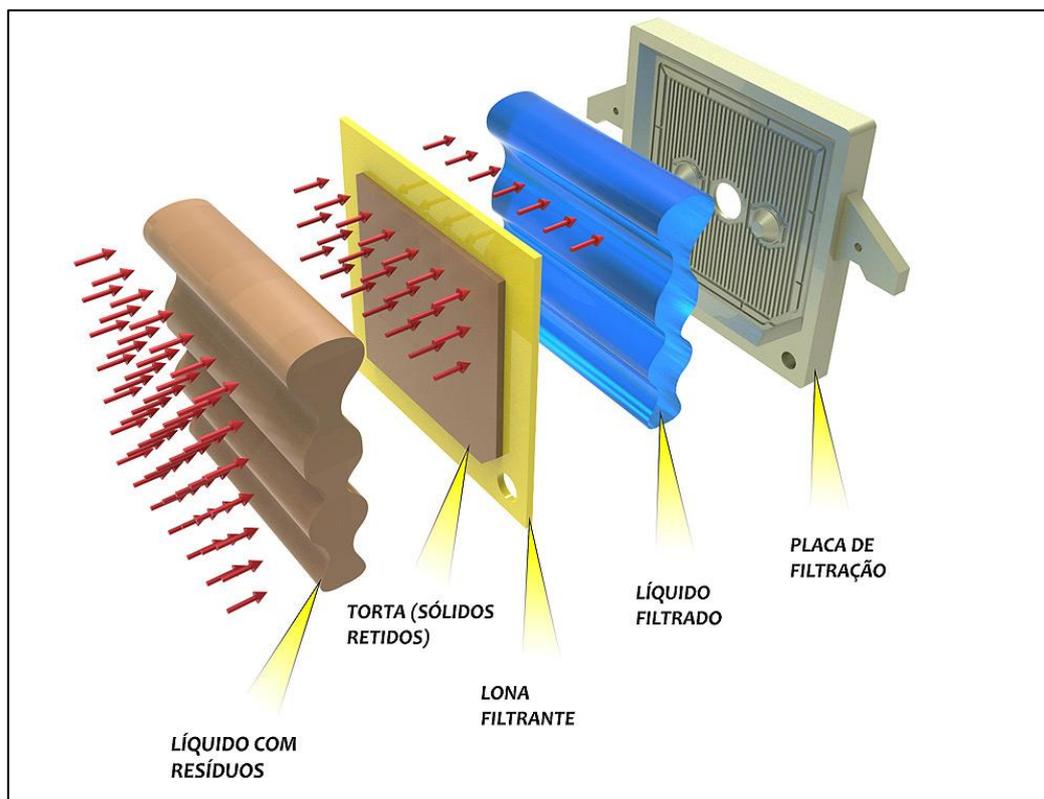


Figura 7.6 – Esquema de funcionamento da filtragem a pressão do filtro prensa (imagem obtida em <https://www.grabe.com.br/filtro-prensa.php>)



Figura 7.7 - Exemplo de filtro prensa utilizado na ALUNORTE (RT-3500-54-G-220-R00)

7.3 CONCEITO DE DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS NO DRS2

Conforme relatório executivo do DRS2, documento MD-3541-54-G-096, o DRS2 foi concebido visando o armazenamento de resíduo proveniente da produção de alumina (lama vermelha de alumínio) gerado pela refinaria da ALUNORTE. O resíduo deve passar por filtragem fazendo uso de filtros prensa e alcançar um teor de sólidos equivalente a 78%.

O rejeito após a filtragem é conduzido e então espalhado e compactado formando uma pilha, tendo sido prevista uma geração anual equivalente a 4.430.320 t/ano na base seca. Além dos resíduos de bauxita, resíduos como de carvão, hidrato, areia e cinza são gerados no processo e dispostos no DRS2, com produção estimada de 235.000 m³/ano.

AVALIAÇÃO DOS ASPECTOS ESTRUTURAIS NO DRS2

Conforme apresentado no item 4, os resíduos dispostos no DRS2 são organizados entre a zona estrutural e zona interna. Além dessas áreas para disposição de resíduos, existe a célula de emergência, local previsto para ser disposto resíduos em condições com excesso de umidade, ou seja, incompatível com o teor de sólidos previsto para o DRS2.

- Zona estrutural

Conforme manual de operação do DRS2, OM-3541-54-G-282 R08, foi considerado que em dias com precipitação igual ou menor que 4mm, o teor de sólidos do resíduo não seria afetado. Desta forma, 100% do resíduo apresentará condições para ser disposto na zona estrutural.

- Zona interna

Conforme manual de operação supracitado, de acordo com a precipitação diária, ao superar 4 mm e ainda for inferior a 25 mm, o resíduo deverá em diferentes proporções ser dividido entre a zona estrutural e a zona interna. Caso a precipitação superar 25 mm, todo o resíduo deve ser direcionado para a zona interna. A Figura 7.8 ilustra a zona interna e zona estrutural.



Figura 7.8 - Depósito DRS2 – Zona interna e zona estrutural (FONNTES, 09/02/2022)

- Célula de Contingência

A Célula de Contingência poderá ser acionada em duas situações, (i) quando a precipitação diária superar 25 mm ou (ii) as condições de trafegabilidade, visibilidade ou qualquer outra impossibilite o ou prejudique o transporte do resíduo até a zona interna ou estrutural. A Figura 7.9 ilustra a Célula de Contingência.



Figura 7.9 - Depósito DRS2 – Célula de Contingência (FONNTES, 09/02/2022)

O transporte do resíduo entre os filtros prensa e o DRS2 ocorre em duas etapas, sendo uma por meio de correias transportadoras e a seguinte por caminhões basculantes.

A primeira etapa consiste no transporte do resíduo por meio das correias transportadoras até galpões projetados para armazenamento temporário dos resíduos (Figura 7.10). Os galpões são cobertos, evitando o aumento da umidade dos resíduos em dias chuvosos. Em seguida, na segunda etapa ocorre a retomada dos resíduos por meio dos caminhões basculantes e o direcionamento para a zona estrutural, zona interna ou Célula de Contingência.

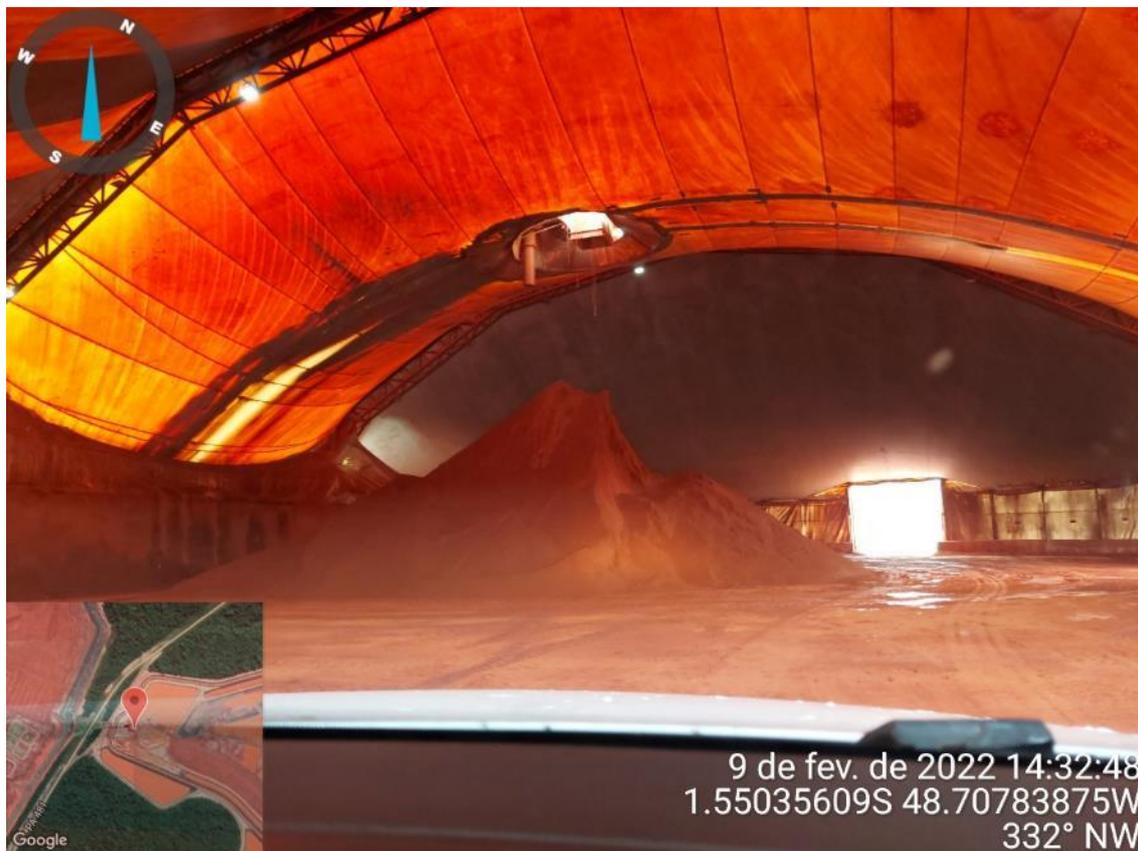


Figura 7.10 – Depósito DRS2 – Galpão para estocagem temporária dos rejeitos (FONNTES, 09/02/2022)

O conceito do projeto do DRS2 foi definido tendo como premissa a filtragem dos rejeitos com base em uma das melhores tecnologias disponíveis. Isso permitiu que o projetista definisse um conceito de projeto muito robusto, o qual tem como chave o atendimento aos critérios de compactação dos resíduos. O clima equatorial quente e úmido da região constitui um dos principais desafios para operacionalização do projeto, sendo necessária a definição de várias especificações operacionais devido às chuvas (galpão de estocagem temporária, Célula de Contingência, etc.). É possível afirmar que o conceito associando o desaguamento de resíduos com uso de filtro prensa e a empilhamento desses resíduos com técnicas de compactação, constitui o estado da arte atual em termos tecnológicos. O sucesso depende principalmente da execução e compactação dos resíduos conforme requisitos de projeto.

8. CONCLUSÕES

Neste documento, foram apresentadas de maneira sucinta as tecnologias clássicas de disposição de rejeitos e as principais tecnologias de filtragem de rejeitos aplicadas na mineração brasileira. Além disso, foi apresentado o método de filtragem dos resíduos no depósito DRS2.

Sobre o DRS2 os resíduos dispostos são provenientes do filtro prensa desde o início de sua operação, atingindo um teor de sólidos de aproximadamente 78%.

Pode-se observar que a escolha da ALUNORTE de utilizar um método de disposição de resíduos como o Empilhamento de Rejeitos Filtrados (seja pelo filtro tambor ou filtro prensa) traz vantagens em relação ao método convencional de disposição dos resíduos em polpa através de barragens convencionais. Entre as vantagens do método adotado pela ALUNORTE, estão:

- A produção de um rejeito filtrado com elevados teores de sólidos;
- A possibilidade de ser utilizado nas zonas estruturais quando submetidos a um rigoroso controle de compactação (aplicável apenas ao resíduo gerado pelo filtro prensa);
- A redução da área necessária para disposição dos resíduos em campo;
- As águas provenientes das etapas de espessamento e filtragem podem ser reutilizadas nos processos minerários, diminuindo a necessidade de água nova no processo; e
- Redução dos impactos ambientais que estariam associados às barragens e diques de contenção.

A tecnologia de filtragem retira a maior parte da água dos rejeitos, o que possibilita um projeto de disposição mais seguro. Para retirar essa água, há um grande gasto energético. Assim, a filtragem possui um maior custo dos processos industriais no

AVALIAÇÃO DOS ASPECTOS ESTRUTURAIS NO DRS2

momento da geração do resíduo comparando com a disposição em polpa em barragens. Entretanto, o custo futuro nos processos de desativação e recuperação ambiental são menores, além dos processos poderem ser executados de maneira mais rápida.

De maneira ampla, é observado no mercado da mineração (principalmente ferro e ouro) um movimento de migração do setor para utilização da filtragem de rejeitos, principalmente devido as últimas rupturas ocorridas em barragens de mineração, como a Barragem do Fundão (Mariana-MG, 2015) e a Barragem B1 (Brumadinho-MG, 2019). A sociedade não tem visto as barragens de rejeitos como estruturas seguras, o que tem forçado os empreendedores a atualização da filtragem que é uma tecnologia mais recente e que pode ser utilizada para desenvolvimento de projetos de disposição mais seguros que as barragens.

Finalmente, é possível concluir que o conceito do projeto do DRS2 foi bem definido em termos de governança. Há uma redução de riscos, consequências de possíveis falhas, bem como o impacto ambiental promovido por alternativas de filtragem ao se comparar com a disposição de rejeitos em polpa em barragens. Ademais, as condições climáticas e topográficas locais foram levadas em consideração uma vez que a disposição a seco em pilha é adequada para áreas planas, mas não para regiões de clima úmido. O clima é um grande desafio no projeto que é tratado com algumas adequações técnicas devido a limitação da disposição durante eventos pluviométricos.

Há uma tendência no Brasil de migração do setor industrial para utilização da filtragem dos rejeitos, seja por uma maior consciência ambiental no uso sustentável da água como na elaboração de projetos de disposição com menores riscos associados.

9. REFERÊNCIAS

- i. AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO – ANM. **RESOLUÇÃO Nº 95, DE 7 DE FEVEREIRO DE 2022 – Consolida os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração.** 2022.
- ii. ALMARAZ, U. J. S. (1977). Aspectos Geoquímicos e Ambientais dos Calcários do Formação Pirabas, Pará. Tese de Doutorado, UFRS, 272 p.
- iii. ALVES, P. I. A. **Empilhamento de rejeito filtrado: a expansão de uma alternativa para substituição de barragens.** Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia de Minas, da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, 2020.
- iv. GUIMARÃES, N. C. **Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando sua disposição em pilhas.** Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2011.
- v. GOMES, M. A. **Caracterização tecnológica no aproveitamento do rejeito de minério de ferro.** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil, 2009.
- vi. FARIAS, E.S.; NASCIMENTO, F.S., FERREIRA, M.A.A. (1992). Estágio de Campo III: relatório final. Área Belém - Outeiro. Belém: Centro de Geociências. Universidade Federal do Pará. 247 p.
- vii. HAQ, B.V.; HARDENBOL, J.; VAIL, P.R. (1987). Chronology of Fluctuating Sea Levels Since the Triassic (250 million years ago to present). Science, 235: 1156-1167 p.
- viii. IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Barcarena/PA. População. 2010. Disponível em <[IBGE | Cidades@ | Pará | Barcarena | Panorama](#)>
- ix. _____. Barcarena/PA. Educação. 2010b. Disponível em <[IBGE | Cidades@ | Pará | Barcarena | Panorama](#)>

AVALIAÇÃO DOS ASPECTOS ESTRUTURAIS NO DRS2

- x. _____. Barcarena/PA. Economia. 2019. Disponível em <[IBGE | Cidades@ | Pará | Barcarena | Panorama](#)>
- xi. _____. Barcarena/PA. Trabalho e Rendimento. 2020. Disponível em <[IBGE | Cidades@ | Pará | Barcarena | Panorama](#)>
- xii. _____. Barcarena/PA. Território e ambiente. 2021. Disponível em <[IBGE | Cidades@ | Pará | Barcarena | Panorama](#)>
- xiii. IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM), **Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração**; organizador. Instituto Brasileiro de Mineração. 1.ed. - Brasília: IBRAM, 2016.
- xiv. LIMA, L. M. K. **Retroanálise da formação de um depósito de rejeitos finos de mineração construído pelo método subaéreo**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, 2006.
- xv. MABESOONE, J. M. e CASTRO, C. (1975). Desenvolvimento Geomorfológico do Nordeste Brasileiro. Boletim do Núcleo Nordeste da SBG, Recife, v.3, p. 05- 35.
- xvi. OLIVEIRA-FILHO, W. L., ABRÃO, P. **Disposição de rejeitos de mineração**. In: ZUQUETTE, L. V. (Org.). Geotecnia Ambiental. Elsevier, Rio de Janeiro, 2015.
- xvii. PEIXOTO, C. L. P. **Proposta de nova metodologia de desaguamento de rejeitos em polpa**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, 2012.
- xviii. PORTES, A. M. C. **Avaliação da disposição de rejeitos de minério de ferro nas consistências polpa e torta**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2013.
- xix. 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.
- xx. SANTOS, L. C. **Análise da variabilidade do processo de filtração em filtros de tambor rotativo contínuo a vácuo para lodo de cana-de-açúcar**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia) Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Bauru-SP.



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