

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

ADRIELY SCHEFFER ARBOITE

**MAPEAMENTO EM SUBSUPERFÍCIE COM MÉTODO DE
ELETORRESISTIVIDADE E ENSAIOS GEOQUÍMICOS PARA
CARACTERIZAÇÃO DO PERFIL EM PROFUNDIDADE DA BARRAGEM DE
REJEITO DA ANTIGA MINAS DO CAMAQUÃ, RS.**

Caçapava do Sul

2022

ADRIELY SCHEFFER ARBOITE

**MAPEAMENTO EM SUBSUPERFÍCIE COM MÉTODO DE
ELETRORRESISTIVIDADE E ENSAIOS GEOQUÍMICOS PARA
CARACTERIZAÇÃO DO PERFIL EM PROFUNDIDADE DA BARRAGEM DE
REJEITO DA ANTIGA MINAS DO CAMAQUÃ, RS.**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Geologia da
Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título
de Bacharel em Geologia

Orientador: Prof.^a Dr.^a. Jéssica Weiler

Coorientador: Msc. Lenon Melo Ilha.

Caçapava do Sul

2022

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

A666m Arboite, Adriely Scheffer

Mapeamento em subsuperfície com método de
eletrorresistividade e ensaios geoquímicos para
caracterização do perfil em profundidade da barragem de
rejeito da antiga Minas Do Camaquã, Rs. / Adriely Scheffer
Arboite.

64 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade
Federal do Pampa, GEOLOGIA, 2022.

"Orientação: Jéssica Weiler".

1. disposição de rejeitos. 2. geofísica. 3. ensaio
estático. 4. composição elementar. 5. mineração e meio
ambiente. I. Título.

ADRIELY SCHEFFER ARBOITE

**MAPEAMENTO EM SUBSUPERFÍCIE COM MÉTODO DE ELETORRESISTIVIDADE E
ENSAIOS GEOQUÍMICOS PARA CARACTERIZAÇÃO DO PERFIL EM PROFUNDIDADE DA
BARRAGEM DE REJEITO DA ANTIGA MINAS DO CAMAQUÃ, RS.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Geologia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Geologia.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em:

17 de março de 2022.

Banca examinadora:

Prof. Dr^a Jéssica Weiler

Orientadora

UNIPAMPA

Prof. Dr. Igor Clemente

UNIPAMPA

Geólogo Bruno Campos

(Ecomin Engenharia Ltda)



Assinado eletronicamente por **JESSICA WEILER, PROFESSOR MAGISTERIO SUPERIOR - SUBSTITUTO**, em 24/03/2022, às 08:59, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **IGOR MAGALHAES CLEMENTE, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 24/03/2022, às 09:22, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **Bruno Teixeira Campos Sousa, Usuário Externo**, em 25/03/2022, às 10:46, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0760600** e o código CRC **F1744DC0**.

Universidade Federal do Pampa, Campus Caçapava do Sul

Dedico principalmente à professora Daniela de Rosso Tolfo (in memoriam) que em função do COVID-19 não pode estar aqui para compartilhar essa conquista.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, minha orientadora e amiga Jéssica, obrigada por aceitar essa ideia louca e escutar muitas reclamações kkkkkk e Lenon, meu coorientador, gratidão por estar sempre disposto a ajudar e ouvir reclamações também, com certeza não teria saído nenhuma geofísica sem você (mas podia ter avisado que era bucha NE?!) me faltam palavras para agradecê-los.

A UNIPAMPA pela oportunidade e a UFRGS pela disponibilidade do laboratório LTM. A disponibilidade da empresa Pro Solo pela disponibilidade da área. Galerinha do campo que diretamente fez esse tcc acontecer Anna Clara, Caio, Thainã, Maria Eduarda, Pablo e Enzo. Aos amigos que indiretamente (me hospedando ou escutando reclamar) também fizeram esse tcc acontecer Ingrid, Dudu, Paula, Bibi, Maya, Tamiris, Michele e outros, meu eterno obrigada.

Agradeço em destaque os ensinamentos da prof Pilar. Pelos companheiros da mateada da biblioteca Marindia, Lucas, Rosimere e Adriano. Aos motoristas, principalmente Beto e seu Antonio pelas longas viagens; a Sissa pela paciência acompanhando nos campos e na vida.

Aos amigos da Unipampa e da geologia, que ao longo desses 5 anos de graduação (ou 6) fizeram parte dessa história. Foram muitas provas, campos, eventos, cervejas, trabalhos em grupo e surtos. Obrigada pelas caronas, lanches, frutas, água (em campo). Meus grupos de mapeamento III e IV, vulgo “map treta” e “map covid”, sobrevivemos. Aos meus amigos que já se formaram, obrigada pelas dicas e manhas (Isadora, Karol, Mayara, Jonas Henrique, Maria, Kiara...). Também aos que aguentaram mais de um mês de campo e cevas Lay, Vini, Pedro, Guinha, Alberto, Alan, Gabriel, Bruna ...

Aos meus companheiros fieis Ju e Gordo, foram longas noites frias no Paleco pra aguentar tudo isso. As minhas gurias Bianca, Natacha, Poliana, Mayra e Nanã, sempre dispostas a enfrentar o mundo junto comigo. Meus amigos de Osório e minha família, que sempre me apoiaram em tudo.

RESUMO

Os rejeitos da mineração estão associados a diversos impactos ambientais. Eles são gerados em grandes quantidades, e, por isso, precisam de grandes áreas para a sua disposição. As barragens de rejeitos são uma forma de disposição e podem causar grandes desastres ambientais. Ainda, mesmo depois de encerradas as atividades, a área continua sendo um passivo ambiental, podendo haver problemas nutritivos do solo para revegetação e surgimento de processos erosivos graves, que implicarão em perda de solo e carreamento de sedimentos aos corpos hídricos do entorno. Dessa forma, o objetivo desse estudo foi analisar o perfil de uma antiga barragem de rejeitos nas Minas do Camaquã, RS. Para isso, utilizou-se o método geofísico de eletrorresistividade para mapeamento da área em profundidade, utilizando cinco linhas cobrindo diferentes áreas da barragem. Após realizada a interpretação dos resultados, selecionaram-se pontos para amostragem em quatro das cinco linhas. As amostras foram preparadas e analisadas em ensaios geoquímicos (pH em pasta e teste de geração de acidez líquida NAG) e análise elementar (EDXRF). Em relação à geofísica, observaram-se diferenças significativas de pelo menos três camadas, onde a mais superficial e com resistividade menor caracteriza-se o rejeito em si, variando até 10 metros de profundidade. O pH medido pelo pH em pasta não apresenta-se ácido, assim como os resultados obtidos pelo teste NAG, onde todas as amostras estão na volta do pH 8 em ambos testes. A análise elementar apresenta como componentes predominantes Si, Al, Fe, Mg e K, indicando presença de minerais silicatados e óxidos de Fe e Al. A partir disso e a partir das metodologias utilizadas neste estudo e para as amostras testadas, o material não possui indícios de geração de acidez e riscos de contaminação quanto aos metais investigados. Entretanto, salienta-se que a barragem possui grandes áreas de solo exposto ou com pouca cobertura vegetal e problemas sérios de erosão, podendo ser fonte de material particulado bem como causar aumento do aporte de sedimentos nos corpos hídricos próximos.

Palavras-Chave: disposição de rejeitos, geofísica, ensaio estático, composição elementar, mineração e meio ambiente.

ABSTRACT

Mining tailings are associated with several environmental impacts. They are generated in large quantities, and therefore need large areas for their disposal. Tailings dams are a form of disposal and can cause major environmental disasters. Also, even after the activities are closed, the area remains an environmental liability, and there may be nutritive problems in the soil for revegetation and the emergence of serious erosive processes, which will imply in loss of soil and transport of sediments to the surrounding water bodies. Thus, the objective of this study was to analyze the profile of an old tailings dam in Minas do Camaquã, RS. For this, the geophysical method of electroresistivity was used to map the area in depth, using five lines covering different areas of the dam. After interpreting the results, points were selected for sampling in four of the five lines. The samples were prepared and analyzed in geochemical tests (pH in paste and NAG liquid acidity generation test) and elemental analysis (EDXRF). Regarding geophysics, significant differences were observed in at least three layers, where the most superficial and with lower resistivity characterizes the tailings itself, varying up to 10 meters in depth. The pH measured by pH in paste is not acidic, as well as the results obtained by the NAG test, where all samples are around pH 8 in both tests. The elemental analysis shows Si, Al, Fe, Mg and K as predominant components, indicating the presence of silicate minerals and Fe and Al oxides. From this and from the methodologies used in this study and for the samples tested, the material has no evidence of acidity generation and contamination risks regarding the investigated metals. However, it should be noted that the dam has large areas of exposed soil or with little vegetation cover and serious erosion problems, which can be a source of particulate matter as well as cause an increase in the contribution of sediments to nearby water bodies.

Keywords: tailings disposal, geophysical, static test, elemental composition, mining and environment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa de localização e situação da área em relação a cidade de Caçapava do Sul. _____	20
Figura 2 – Mapa dos domínios geotectônicos do RS em relação à área de estudo. _____	21
Figura 3 – Coluna estratigráfica da região aflorante do depósito da Mina do Camaquã. _____	23
Figura 4 - Disposição da barragem de rejeitos atualmente, em (a) em meio a plantação de Pinus vemos o assoreamento do material exposto, (b) plantação de Pinus para cortina verde e em (c) material exposto e ao fundo parte da recuperação vegetal. _____	25
Figura 5 – Diferentes tipos de materiais e suas respectivas resistividades e condutividades. _____	33
Figura 6 – Esquema do arranjo dipolo - dipolo com a técnica caminhamento elétrico. _____	35
Figura 7 – a) Resistímetro modelo Syscal Pro e b) detalhe do eletrodo na linha. _____	36
Figura 8 – Distribuição das linhas de eletrorresistividade (amarelas) e pontos de amostragem localizados (estrelas). _____	42
Figura 9 – (a) Perfil de caminhamento elétrico (linha 1) para o arranjo Dipolo-Dipolo e (b) local da amostragem realizada e interpretação feita a partir dos resultados obtidos. _____	43
Figura 10 – Situação da linha 1, foi realizada em meio a tentativa de recuperação com plantação de pinos, que se encontram subdesenvolvidos. _____	44
Figura 11 – (a) Perfil de caminhamento elétrico (linha 2) para o arranjo Dipolo-Dipolo e (b) local da amostragem realizada e interpretação feita a partir dos resultados obtidos. _____	45
Figura 12 – (a) Perfil de caminhamento elétrico (linha 3) para o arranjo Dipolo-Dipolo e (b) local da amostragem realizada e interpretação feita a partir dos resultados obtidos. _____	46
Figura 13 – (a) Perfil de caminhamento elétrico (linha 4) para o arranjo Dipolo-Dipolo e (b) local das duas amostragens realizadas e interpretação feita a partir dos resultados obtidos. _____	47
Figura 14 – Linha 4 em parte da barragem de rejeitos sem plantações, representa a maior parte da barragem. _____	48
Figura 15 – (a) Perfil de caminhamento elétrico (linha 5) para o arranjo Dipolo-Dipolo e (b) interpretação feita. Não foi possível amostrar nessa linha. _____	49
Figura 16 – Procedimentos realizados (a) etapa preparação para quarteamento, (b) pH em pasta, (c) para teste NAG e em (d) após adição do peróxido de hidrogênio. _____	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais minerais sulfetados causadores de drenagem ácida de mina e suas respectivas fórmulas químicas.	30
Tabela 2 – Minerais e suas fórmulas químicas com seu potencial de neutralização (NP).	31
Tabela 3 – Resumo da amostragem realizada nas linhas 1, 2, 3 e 4.	50
Tabela 4 – Resultados obtidos a partir do teste de pH em pasta e NAGpH.	52
Tabela 5 – Compostos minerais que gerariam acidez e/ou consomem alcalinidade nas amostras observadas.	53

LISTA DE ABREVIATURAS

ABA – Balanço Ácido – Base;

AP – Potencial de Acidez;

Au – Ouro;

BC – Bacia do Camaquã;

CE – Caminhamento Elétrico;

Cu – Cobre;

DAM – Drenagem Ácida de Mina;

DDP – Diferença de Potencial;

EDRFX – Espectrometria de Fluorescência de Raios-X por Energia Dispersiva.

ER – Eletroresistividade;

ESRG – Escudo Sul Rio-Grandense;

IP – Indução Polarizada;

MG – Minas Gerais;

NAG – Geração Ácida Líquida;

NNP – Potencial de Neutralização Líquido;

PN – Potencial de Neutralização;

Pb – Chumbo;

Zn – Zinco.

LISTA DE SIGLAS

ANM - Agência Nacional de Mineração;

PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos;

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente;

CBC – Companhia Brasileira de Cobre;

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	18
3	JUSTIFICATIVA.....	18
4	LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	20
5	CONTEXTO GEOLÓGICO	21
6	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	26
7	MATERIAIS E MÉTODOS	35
8	RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
9	CONSIDERAÇÕES FINAIS	54
10	ESTUDOS FUTUROS	55
	REFERÊNCIAS.....	56
	APÊNDICES:	62
	ANEXOS	63

INTRODUÇÃO

A mineração é descrita segundo a Agência Nacional de Mineração (ANM) como o conjunto formado por extração e beneficiamento de minerais em seu estado natural, como em minas subterrâneas e minas a céu aberto. Isso integra todos os processos de preparação e beneficiamento do minério em geral para torná-lo comercializável (ANM, 2016), incluindo estudos prévios de pesquisa, prospecção, extração, transporte, processamento, beneficiamento e comercialização do minério conforme artigo 6º - A.:

A atividade de mineração abrange a pesquisa, a lavra, o desenvolvimento da mina, o beneficiamento, o armazenamento de estéreis e rejeitos e o transporte e a comercialização dos minérios, mantida a responsabilidade do titular da concessão diante das obrigações deste Decreto-Lei até o fechamento da mina, que deverá ser obrigatoriamente convalidado pelo órgão regulador da mineração e pelo órgão ambiental licenciador (ANM, 2016).

Devido a isso, sabe-se que a atividade minerária pode causar diversos problemas ambientais de pequeno a grande porte e de forma branda ou catastrófica. De forma geral, o impacto que a mineração causa para o meio ambiente pode ser desde mudanças na paisagem, emissões atmosféricas, consumo e contaminação de recursos hídricos (MILANEZ, 2017), contaminações locais, superficiais, em profundidade, poluição visual, sonora e até impactos sobre a comunidade.

Sobre a disposição de rejeitos de mineração, desde 2010, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) se tornou imprescindível para o gerenciamento desses rejeitos, visto que pode torná-los classificáveis e gerenciáveis, afim de que não ocorra disposição de maneira incorreta, acometendo em impacto de longo prazo e altos investimentos para recuperação do meio ambiente. Segundo a lei PNRS 12305/2010 cada um dos tipos de resíduos gerados pela mineração, rejeitos ou estéreis, tem seu manejo e destinação final adequados, evitando que sejam manipulados e postos de forma inadequada, causando não somente problemas ambientais, mas também para população local.

Os rejeitos de mineração podem sofrer diversos problemas externos, como contaminações ambientais - a geração de Drenagem ácida de mina (DAM) e também problemas de rompimentos da barragem, associados a grandes desastres.

São exemplo os desastres de Minas Gerais (MG) na barragem do Fundão (2015) e Córrego do Feijão (2019), causando impactos socioambientais de grande magnitude, com a extensa contaminação, impactos florestais, tratamento de recursos hídricos entre outros, conforme reunido por Almeida, Pereira, Teodoro *et al.*, (2020).

ANM (2019) determinou que as barragens de rejeitos construídas ou alteadas pelo método a montante, como Brumadinho e Mariana sejam descomissionadas e descaracterizadas até o ano de 2023. A resolução 85/2021 também mostra detalhamento sobre como os rejeitos minerários devem ser acondicionados. Essa resolução dispõe sobre quais os procedimentos para o aproveitamento de rejeitos e estéreis e tem o objetivo de tornar as atividades de extração de minérios mais sustentáveis.

As tendências de alternativas para a disposição de rejeitos provindos de atividades minerárias cada vez mais está em ênfase. As empresas de mineração devem pensar reduzir dos impactos ambientais e custos relacionados aos processos de contenção e recuperação de água do processo (SOUZA, 2018). Logo, descomissionar uma mina significa desativá-la, além de dismantelar sua estrutura, “repartindo-a” em estruturas menores, buscando programar a transição entre o fechamento e o uso futuro da área.

Inúmeras ações devem ser desenvolvidas a partir da contenção dos rejeitos, tais como a recuperação e nova destinação aos rejeitos de mineração, a descaracterização das barragens e a recuperação da área degradada (THOMÉ, RIBEIRO, 2019). Dito isso, é de extrema importância conhecer a área em que o rejeito foi disposto para que se tenha um plano de recuperação da área dessas barragens e seja bem executado.

A região de Caçapava do Sul é conhecida como a capital geodiversidade e pela atuação em mineração, atualmente pelos depósitos de mármore utilizados para produção do calcário, além do cobre e ouro, no distrito de Minas do Camaquã, que foi realizado na década de 70 teve exploração até 1996. Hoje em dia tem se conhecido áreas próximas a antiga Mina do Camaquã, como a jazida Santa Maria com ocorrência de chumbo (Pb) e zinco (Zn). Na área dessa mina, encontra-se uma antiga barragem onde eram dispostos os rejeitos do beneficiamento mineral. Essa barragem ocupa uma grande área de aproximadamente 1.500.000 m² possui rejeito

exposto (sem cobertura vegetal) em grande parte de sua extensão. Isso é um problema caso ocorra o carreamento de partículas e sedimentos devido ação natural para os corpos hídricos próximos. A região está inserida na Sub-bacia Hidrográfica Arroio João Dias (SbHAJD) e conforme Bruch (2014) faz parte das Sub-bacias da Bacia Hidrográfica do Rio Camaquã (um importante rio que abastece diversas regiões).

Em virtude do risco que esses rejeitos representam quando mal alocados, tendo a consciência dos problemas que os cercam, desde sua geração até a disposição final, este trabalho teve como objetivo a caracterização internamente a partir da geofísica e análises geoquímicas na barragem de rejeitos em Caçapava do Sul – RS. Espera-se contribuir para o desenvolvimento e evolução da gestão de rejeitos provenientes da mineração, beneficiando não somente o meio ambiente, como também os projetos posteriores. A barragem é um passivo ambiental, devido à área que ocupa e o material superficial e em profundidade que armazena, visto que não está recuperada de forma adequada. Assim, além de problemas relacionados com contaminações, podem ocorrer problemas pela grande quantidade de material particulado (poluição atmosférica) e material carreado para as proximidades por processos erosivos.

2 OBJETIVOS

O presente trabalho busca caracterizar o perfil da barragem de rejeitos das Minas do Camaquã, na região de Caçapava do Sul combinando o uso do método geofísico eletrorresistividade e ensaios geoquímicos.

2.1 Objetivos específicos

- a) Caracterizar e delimitar potenciais áreas com presença de rejeitos;
- b) Obter respostas em 2D das linhas geofísicas;
- c) Interpretar parâmetros geoquímicos por meio de ensaios estáticos e composição elementar;
- d) Análise conjunta dos resultados obtidos nos ensaios geofísicos e geoquímicos.

3 JUSTIFICATIVA

A atividade minerária pode ser a causadora de diversos impactos ambientais já conhecidos, os quais poderiam ser evitados com mínimos estudos e monitoramentos. No caso de barragens de rejeitos já dispostas no meio ambiente é necessário que se estudem não só os problemas superficiais, mas também internamente para conhecer “subsuperfície” e poder avaliar como será a recuperação mais adequada segundo suas características.

Para a recuperação das barragens, é importante saber qual nível de degradação da mesma, para então conseguir que a área volte a estar apta para o uso produtivo e em equilíbrio ambiental da mesma.

Na região de Caçapava do Sul são encontradas situações em alguns locais que podem ter riscos de geração de DAM, como a Mina do Camaquã, que continha principalmente Cobre (Cu) como produto e Ouro (Au) como principal subproduto e conta atualmente com a lavra exaurida e uma barragem de rejeitos seca. A lavra desse depósito gerou quantidades significativas de rejeitos ricos em sulfetos que

poderiam gerar vários tipos de passivo ambiental. Por este motivo é importante o conhecimento e caracterização da área do rejeito, para que tenha aptidão de uma recuperação efetiva do local.

A utilização da geofísica pode auxiliar no conhecimento da disposição interna dos componentes e a distribuição de materiais mais reativos na barragem. A eletrorresistividade, por exemplo, indica respostas elétricas dos materiais, podendo contribuir para verificar possíveis localidades de percolação de água e diferentes granulometrias, podendo verificar até presença de áreas com concentração de minerais específicos que poderiam causar contaminações diversas.

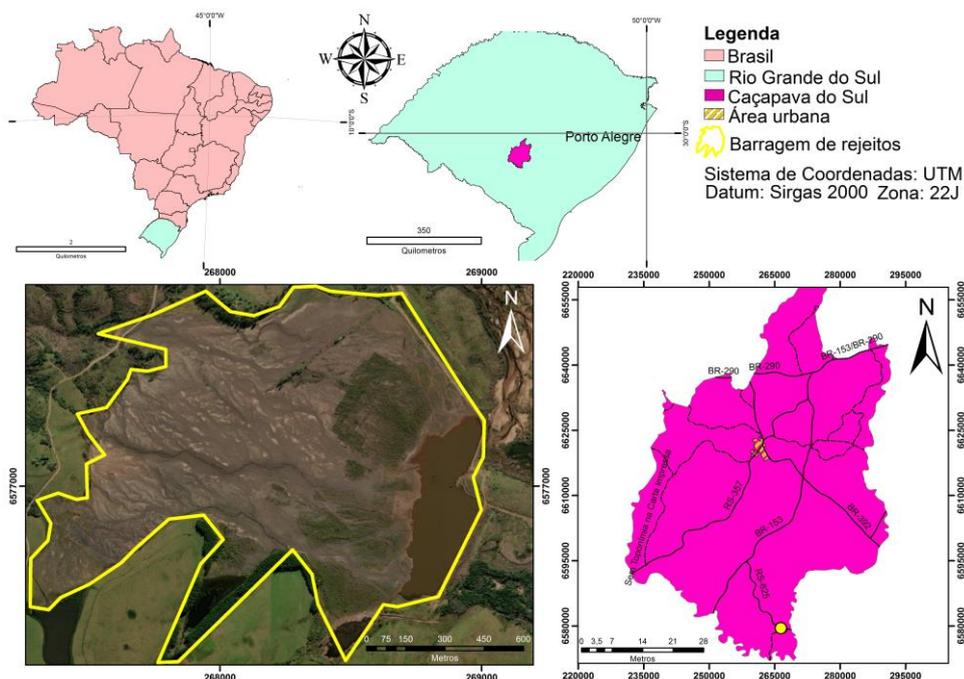
O estudo é importante para verificar possíveis áreas com risco de contaminação tendo em vista os grandes impactos que a disposição desse rejeito ainda está nos dias atuais. A barragem ocupa uma área significativa, e é possível ver tentativas de recuperação da área, como o crescimento de Pinos em alguns pontos, mas não efetivas a toda área. Neste contexto, o presente trabalho justifica-se por apresentar uma contribuição com vistas às questões ambientais da área do rejeito abordando estudos de caracterização interna do rejeito para melhor compreensão e auxílio no planejamento de soluções para controle de impactos e recuperação da área efetivamente.

4 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O local de estudo está localizado em Caçapava do Sul, situada na região sudoeste do estado do Rio Grande do Sul, distante 260 km da capital Porto Alegre, com acesso pela BR-290 sentido oeste, até o entroncamento com BR-392, seguindo ao sul. A área do estudo acessa pela BR-392 até trevo pra Bagé com a BR-153, por estrada vicinal secundária RS – 625 até a vila das Minas do Camaquã. O acesso para a barragem de rejeitos é pela rua principal da cidade, passando pela Igreja e Cinema (pontos principais), até bifurcação. Pode se seguir tanto pela rua em frente ou a oeste, caso siga a leste passa-se pelo CTG Ronda Crioula. Como a área é privada, foi necessário autorização da empresa Pró Solo, que atualmente é proprietária.

A área específica de estudo é uma barragem de rejeito que se localiza nas Minas do Camaquã, no 3º distrito do município de Caçapava do Sul, tendo coordenadas centrais UTM 268353 mE 6577258 mS com DATUM: SIRGAS 2000. Configura-se na carta topográfica de Minas do Camaquã, MI 296/3. A Figura 1 representa o mapa de localização e indicação da área da barragem.

Figura 1 – Mapa de localização e situação da área em relação a cidade de Caçapava do Sul.



FONTE: modificado de IBGE (2009).

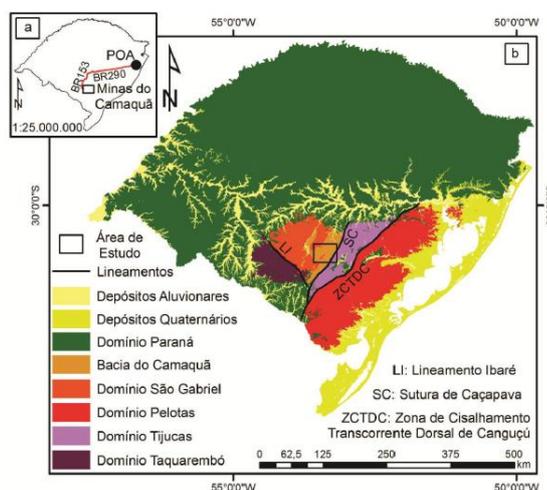
5 CONTEXTO GEOLÓGICO

5.1 Geologia regional

As rochas Pré-Cambrianas do sul do estado do Rio Grande do Sul caracterizam o ESRG, simbolizam a parte meridional da Província Mantiqueira (ALMEIDA & HASUI, 1984). Estruturado por rochas de caráter metamórfico, ígneo e sedimentar associada aos estágios pré, sin e pós colisionais da Orogênese Brasileira de idade neoproterozoico, a geração e deformação da crosta continental, responsáveis pela geração do ESRG ocorreram em processos primeiramente no ciclo de idade paleoproterozoica (2,26 - 2,00 Ga), seguido do ciclo neoproterozoico, denominado Ciclo Brasileiro (900 - 535 Ma) (HARTMANN *et al.*, 2007).

Hartmann *et al.*, (2007) definiram quatro domínios geológicos que podem ser individualizados por suas diferenças estruturais, petrotectônicas e isotópicas (Figura 2): Terreno Taquarembó, representante do Cráton Rio de La Plata; Terrenos São Gabriel, Tijucas e o Batólito Pelotas, constituintes do Cinturão Dom Feliciano de idade neoproterozoica. O domínio Tijucas pertence ao núcleo paleoproterozoico, representante o Complexo Encantadas. Subdividem-se entre a Zona de Cisalhamento Dorsal do Canguçu, o domínio Pelotas do Tijucas e o Lineamento Ibaré entre o domínio Taquarembó e São Gabriel.

Figura 2 – Mapa dos domínios geotectônicos do RS em relação à área de estudo.



FONTE: modificado de Travassos *et al.* (2014).

5.2 Bacia do Camaquã

Segundo Paim, Chemale e Lopes (2000) e Paim e Lopes (2000) o preenchimento da bacia do Camaquã gerou cerca de 8000m de espessura, desde o Neoproterozoico, do ediacarano ao ordoviciano em uma sucessão de bacias. Repousa-se em terrenos ígneos e metamórficos do ESRG, com direção predominante NE-SW, dentro do contexto do Dom Feliciano. Na base é composta pelo batólito Pelotas e granitóides intrusivos.

O supergrupo Camaquã subdivide em quatro grupos, Maricá, Bom Jardim, Santa Barbara, Guaritas. Serão descritos conforme alogrupos por serem mais simples de identificar, segundo Paim e Lopes (2000), as sequências subdividem-se por discordâncias angulares desde a base (Maricá) até o topo (Guaritas). Na atualidade, é separada a oeste pelo alto do embasamento de Caçapava do Sul e a leste da Serra das Encantadas, restringida ao norte pela Bacia do Paraná.

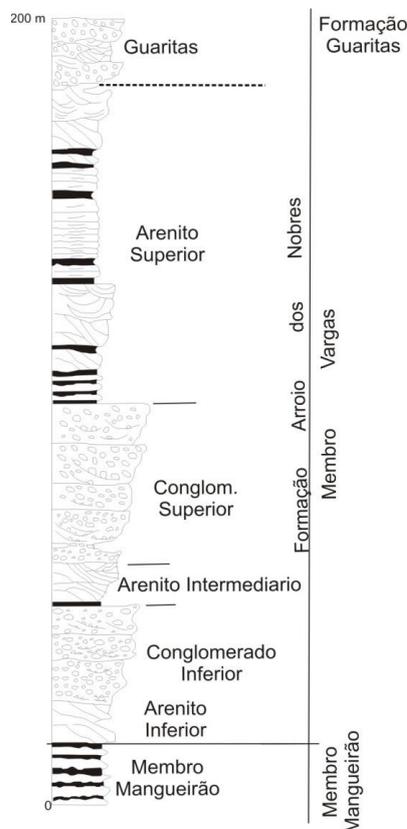
No grupo Maricá condiz-se a base do Supergrupo Camaquã, uma bacia de retro-arco do Cinturão Dom Feliciano, preenchida pelos depósitos fluviais conglomeráticos e areníticos turbidíticos e tempestáticos, sendo suas duas unidades litoestratigráficas: Formação Passo da Promessa e São Rafael (FRAGOSO CESAR, 2016). O grupo Bom jardim limita-se por vulcanismo shoshonítico da Formação Hilário em sua base; as sedimentares seguem preenchendo com arenitos e pelitos turbidíticos e conglomerados fluviais. No grupo Santa Barbara apresenta formação Serra dos Lanceiros (fluviais entrelaçados) e Pedra do Segredo (sistemas deltaicos) e formação Guaritas a depósitos eólico-aluviais, mostra-se em discordância angular com grupo Bom Jardim abaixo, e acima com Grupo Guaritas, neste último são identificados a formação Guaritas, importante depósitos eólico-aluviais continentais em clima desértico.

5.3 Geologia local

Hospedadas no grupo Bom Jardim de idade Neoproterozóica-Cambriana na janela Bom Jardim, contida em rochas areníticas e conglomeráticas (Figura 3) da formação Santa Bárbara separada em membros Mangueirão e Vargas, onde se

dispõe o minério de cobre. A condição da mineralização se dá por falhas de direções NW-SE que estão os filões com o sulfeto maciço (LINDERBERG, 2014). As minas São Luiz e Uruguai destacam-se pelas ocorrências de cobre nos filões e filonetes e ainda stockworks revestidos por calcopirita, calcita, bornita e pirita maciças com minerais de ganga de composição quartzosa, calcítica, hematítica e baritítica. Possuem zonas detalhadas de cloritização, hematitização e ilitização, silicificação e carbonatação (LINDENBERG, 2014).

Figura 3 – Coluna estratigráfica da região aflorante do depósito da Mina do Camaquã.



FONTE: retirado de Troian (2009).

Para texturização presente, ocorrências de infiltração, dissolução e precipitação concomitante a formação do minério de cobre (LAUX, 1999) e tem sua paragênese se dá por quartzo, pirita, calcopirita, bornita, barita e calcita, respectivamente. A mineralogia do minério então se deu por minerais metálicos tais como calcopirita, bornita, calcocita, hematita e pirita enquanto que os minerais de ganga eram formados principalmente por quartzo e feldspatos.

5.4 Barragem de rejeitos

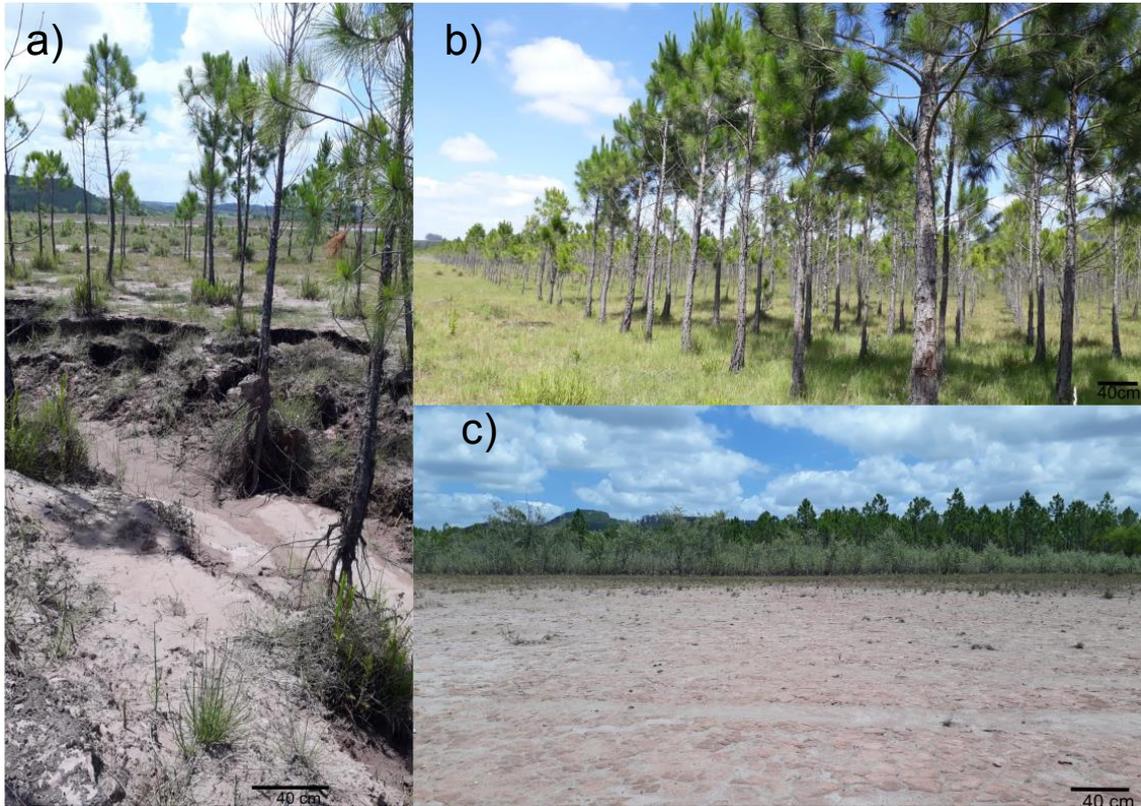
O material disposto na barragem de rejeito provém do beneficiamento mineral, operação de flotação de Cu e Au (principalmente). A barragem recebeu rejeitos durante 13 anos e compreende uma área de 122,28 ha com 21.874.944 toneladas de rejeitos (ABIB, 1979). Na barragem foram dispostos materiais sólidos e água em forma de polpa. Hoje a barragem está seca e tem potencial de contaminações se os materiais forem expostos ao meio ambiente, acarretando DAM, infiltração de contaminantes dos metais no solo.

As vistas da preocupação ambiental para a indústria de mineração, tendo em função os possíveis prejuízos à qualidade das águas subterrâneas e superficiais. A parte mais externa da pilha de rejeitos são pioneiras para geração de DAM entre outros passivos (SEGREDO, 2014).

Já com as atividades encerradas, a barragem está seca, mas possui diversos materiais, como sulfetos metálicos, que podem causar impactos a meio ambiente quanto da ocorrência de exposição, como em processos de lixiviação, oxidação e outros. Atualmente, encontra-se com uma vasta área de rejeitos expostos. É possível ver plantações de Pinos (Figura 4) em uma pequena parte da barragem, provavelmente parte de uma recuperação e também áreas alagadas na porção leste conforme (Figura 1). A Companhia Brasileira do Cobre – CBC começou a revegetação em 1890 e 1980 por influencia do órgão ambiental (BRUCH, 2014), houve a cobertura com materiais argilosos com capacidade neutralizante, correção do pH e melhoria da fertilidade com solo orgânico no rejeito, pois na época se encontrava com pH 2 e então plantou-se pinos para o objetivo de fixar o material particulado e melhorar a paisagem, mas apenas 15 há foram revegetados da área total da barragem. E em outra leva de plantações de pinos, não foi corrigido o rejeito para receber a plantação, não se obtendo maturidade desse plantio.

Para reter as partículas sólidas para evitar transporte pelo ar foi experimentada a plantação de Pinos com substrato corrigido e não corrigido, mas ainda tem cerca de 90% da área descoberta dessa cortina verde e parte desses pinos está subdesenvolvido (porção em que não foi corrigida).

Figura 4 - Disposição da barragem de rejeitos atualmente, em (a) em meio à plantação de Pinos vemos o assoreamento do material exposto, (b) plantação de Pinos para cortina verde e em (c) material exposto e ao fundo parte da recuperação vegetal.



FONTE: autora.

6 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta revisão bibliográfica aborda definições e aspectos relevantes de impactos ambientais da mineração, caracterização de rejeitos, minerais com potencial de geração de acidez e alcalinidade e método geofísico de eletrorresistividade.

6.1 Definições importantes

Beneficiamento: constitui a parte que acontece após a extração do minério, envolve o tratamento do minério em etapas de cominuição (britagem, moagem) e classificação, concentração, flotação, desaguamento para obter o produto final (LUZ, SAMPAIO, ALMEIDA, 2004).

Estéril: é parte proveniente da extração do minério, se retira para chegar ao minério de interesse, o decapeamento das rochas e solos envolventes para viabilizar o acesso a jazida é composto por resíduos sólidos (NIERWINSKI, 2019), este processo faz parte do desenvolvimento mineiro. Já demonstrada na lei 12305/2010 (Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS) sua destinação de forma adequada inclui a sua reutilização, reciclagem, recuperação, aproveitamento ou outro tipo de destinação permitida segundo órgãos ambientais.

Rejeito: é o material que resultou do processo de beneficiamento do mineral escolhido, material que não tem valor econômico, normalmente este fica armazenado em barragens ou diques (NIERWINSKI, 2019). Pela lei PNRS 12305/2010 diz que rejeitos têm uma destinação final exclusivamente para a disposição ambientalmente adequada, não havendo possibilidades de reutilização ou reciclagem.

6.2 Problemas ambientais da mineração

A mineração teve intensa evolução com o passar dos anos, onde foi possível o avanço da sociedade atual, tendo em vista que quase tudo vem do produto da

mineração. Os materiais conhecidos como metálicos sempre foram utilizados, tanto para indicar riqueza e embelezar a população como para fabricação de utensílios como espadas e facas. Desde a idade do Bronze já se utilizavam os metais entre a extração e fundição e havia a procura desses bens para desenvolvimento da sociedade. A metalogênia, estudo da gênese dos depósitos minerais no espaço e no tempo, serve como base conceitual e factual para a estimativa de potencial mineral e, assim, promove a descoberta e o desenvolvimento de novos depósitos minerais (BIZZI, *et al.*, 2003).

A região de Caçapava do Sul foi conhecida por intensa atividade minerária no passado até exaurir-se economicamente, isso por sua vez alavancou os estudos sobre diversas áreas a fim de mapear regiões mais ricas em metais, como a jazida Santa Maria, com sulfetos de Pb e Zn (BADI e GONZALEZ, 1988). Podendo ser associado a muitos outros minerais, o ouro, cobre, chumbo e zinco são as principais formas encontradas desses metais na região, podendo ser reavaliado o potencial econômico mineral da Bacia do Camaquã (PAIM, 2002).

A mineração de minerais metálicos como Cu, Zn, Fe e Mn devem levar em consideração seus pontos negativos, pois quando os mesmos são liberados no meio em proporções acima dos limites podem contaminar solos, água, ser tóxicos para animais e causar diversos problemas ambientais (LAYBAUER, 1995). Os procedimentos da exploração do minério, tanto para método subterrâneo ou céu aberto causam mudanças consideráveis na topografia pela extração e deposição dos rejeitos em locais fora da procedência inicial, havendo exceções, como a lavra em tiras (stripmining) para depósitos de carvão ou quando preenchem cavas exauridas com rejeitos da própria cava (KOPENZINSKI, 2000). A melhoria dos controles ambientais, a gestão de resíduos e fiscalização com o passar dos anos diminuiram os impactos gerados, mas ainda se obtêm quantidades significativas de passivos ambientais oriundas da mineração. Além do impacto ao meio ambiente, cada passivo ambiental requer custos legais como: indenizações, despesas para áreas degradadas etc (SANCHEZ, 2001; MILARÉ, 2004).

Segundo a resolução CONAMA nº 001/86 um impacto ambiental é descrito como:

Qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetam:

I - A saúde, a segurança e o bem-estar da população;

II - As atividades sociais e econômicas;

III - A biota;

IV - As condições estéticas e sanitárias do meio ambiente;

V - A qualidade dos recursos ambientais (CONAMA, 1986).

O impacto ambiental causado pela atividade de mineração e metalurgia vem desde a implantação do empreendimento até posterior ao fechamento da mina, pois o risco de contaminação do ecossistema da região está presente a todo o momento. Para isso existem leis, órgãos, fiscalizações a fim de evitá-los e/ou remediá-los. As barragens de rejeitos ou barragens de contenção são exemplos que acometem o meio ambiente (MESQUITA; CARVALHO; OGANDO, 2016).

Gerados rejeitos eles precisam ser dispostos em locais, como uma barragem de rejeito. Ibram (2016) retrata que a geração de estéreis e rejeitos depende da tipologia dos minérios lavrados, para minérios não metálicos destina-se uma vasta formação de estéreis, já minérios metálicos que são convenientes uma transformação mineral (beneficiamento) o qual vai caracterizar elevados volumes de rejeitos. Como exemplo, partículas finas e ultrafinas sem o valor comercial provindas do beneficiamento são consideradas rejeitos de mineração, com pouca possibilidade de ser reaproveitado ou recuperado.

Os rejeitos podem ter descarte à seco ou à úmido. O descarte à úmido se dá como 'polpa' uma mistura de água e sólidos para facilitar o transporte por fluxo gravitacional nos dutos até o local que assentara, normalmente em bacias ou barragens de rejeitos (VICK, 1983). A escolha de como ficará disposto esse rejeito se dá de diversas formas, dependendo de fatores do tipo da mineração, mecânicos, naturais e seus impactos (DUARTE, 2008).

Atualmente as barragens de rejeitos são conhecidas por inúmeros acidentes (ex. Mariana, Brumadinho) devido ao método de alteamento (o método à montante é o mais usado e relacionado a rupturas catastróficas). As barragens não apresentam só problemas de rompimento, o processo inteiro da formação da barragem tem

capacidade de um impacto significativo se não controlado (DAVIES e MARTIN, 2000; MARTIN e MCROBERTS, 2002).

Os rejeitos dispostos dependendo de suas características ficarão armazenados em uma barragem por muitos anos, caracterizando-se por um passivo ambiental: ocupam grandes áreas, modificam paisagem, alteram a topografia, tem potencial de contaminação do meio, entre tantos outros impactos.

6.3 Geração de acidez e alcalinidade de rejeitos

É de conhecimento geral os minerais formadores de rochas, e tais minerais podem gerar alcalinidade ou acidez devido sua interação com a atmosfera e presença de água ou não. A DAM é um problema muitas vezes associados a depósitos de carvão e outras em depósitos polimetálicos, devido à quantidade de sulfetos, como a Pirita (Tabela 1) que quando oxidada e em contato com ar e água, gera um efluente ácido ($\text{pH} < 4$) (CAMPANER & SILVA, 2009). A interação do rejeito com meio circundante pode gerar uma série de fatores que causariam a poluição ambiental. Conforme Borma e Soares (2002) a caracterização física, química, mineralógica e a identificação do potencial de geração de ácido de resíduos de mineração são essenciais para gestão dos impactos ambientais da disposição do mesmo, pois podem ser formadores de DAM (BORMA, SOARES, 2002).

Segundo Pereira (2010), o processo de extração leva a exposição de estéril e rejeito que por sua vez vai acelerar a reação de oxidação dos minerais presentes nessas rochas, como pirita, pirrotita, arsenopirita e calcopirita quando entrar em contato com oxigênio da atmosfera. A partir disso geram-se contaminantes nas águas de mina como: alta concentração de sulfatos e metais, tais como manganês, ferro e alumínio (SEGREDO, 2014).

Como característica seu pH abaixo de 4, causa maior solubilidade de metais que vão causar toxicidade para a vida lófica dessas águas contaminadas, pois esse meio precisa de condições neutras para vida (SEGREDO, 2014).

Tabela 1 – Principais minerais sulfetados causadores de drenagem ácida de mina e suas respectivas fórmulas químicas.

MINERAIS	COMPOSIÇÃO
Pirita	FeS ₂
Arsenopirita	FeAsS
Calcopirita	CuFeS ₂
Calcocita	Cu ₂ S
Covelita	CuS
Galena	PbS
Milerita	NiS
Molibdenita	MoS ₂
Bornita	CuFeS ₄
Pirrotita	Fe ₁₁ S ₁₂
Esfarelita	ZnS

FONTE: retirado de Gray (1997).

Assim os minerais que contem sulfato, são geradores de acidez e que podem gerar DAM e outros problemas, também vemos os minerais podem gerar também alcalinidade, ou seja, consomem a acidez de minerais que liberam acido. Como é o caso da calcita, dolomita. Também temos os minerais inertes como o quartzo, conforme visto na Tabela 2. O uso de carbonatos para remediação, contenção e prevenção da DAM é muito estudado e têm resultados promissores, tais técnicas são descritas por Kontopoulos (1998).

Tabela 2 – Minerais e suas fórmulas químicas com seu potencial de neutralização (NP).

Grupo/mineral	Fórmula química	NP – potencial de neutralização
Apatita	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH,F,Cl}$	8
Calcita	CaCO_2	1000
Dolomita	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	1084
Caulinita	$\text{Al}_4[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_8$	0
Nefelina	$\text{Na}_3(\text{Na,K})[\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{16}]$	25
Olivina	$(\text{Mg,Fe})_2[\text{SiO}_4]$	38
Pirita	FeS_2	0
Quartzo	SiO_2	0
Siderita	FeCO_3	864

FONTE: modificado de Fox-Parbhakar (2012).

6.4 Eletroresistividade

A geofísica utiliza os princípios da física no estudo da terra e são considerados métodos indiretos de investigação da subsuperfície. Métodos geofísicos podem ser aplicados em toda a Terra com intuito de identificar as variações de propriedades físicas contidas em profundidades (KEAREY, 2009). Uma das premissas da geofísica é a necessidade de haver contrastes físicos das suas propriedades, para obter respostas significativas.

Borges (2007) expôs que o método da eletroresistividade se dá de forma fácil, simples e rápida com produtos finais satisfatórios, tendo apenas como inviável um detalhe de resolução espacial.

De acordo com Kearey (2009) uma característica dos métodos elétricos é a utilização de correntes direitas ou alternadas de baixa frequência, a fim de procurar as propriedades elétricas de subsuperfície.

A eletrorresistividade envolve uso de correntes elétricas artificiais no solo e então, medem-se as diferenças de potencial resultantes em subsuperfície. À medida que a corrente elétrica gerada por um par de eletrodos, a diferença de potencial (DDP) será quantificada em outro par eletrodo, dando origem a desvios padrões nas quais fornecerão informações de forma e propriedades em subsuperfície (KEAREY, 2009). Com quatro eletrodos, assume-se que a resistividade será constante, e calculada através da expressão 1, fundamentada pela Lei de Ohm, determina a corrente elétrica que percorre no condutor é proporcional a voltagem dos terminais.

$$\rho = K \frac{\Delta V}{I} \quad (1)$$

Onde:

ρ = resistividade elétrica (ohm, m);

K = fator geométrico (m);

ΔV = diferença de potencial entre os pontos M e N (mV);

I = intensidade de corrente que passa entre os eletrodos A e B (mA);

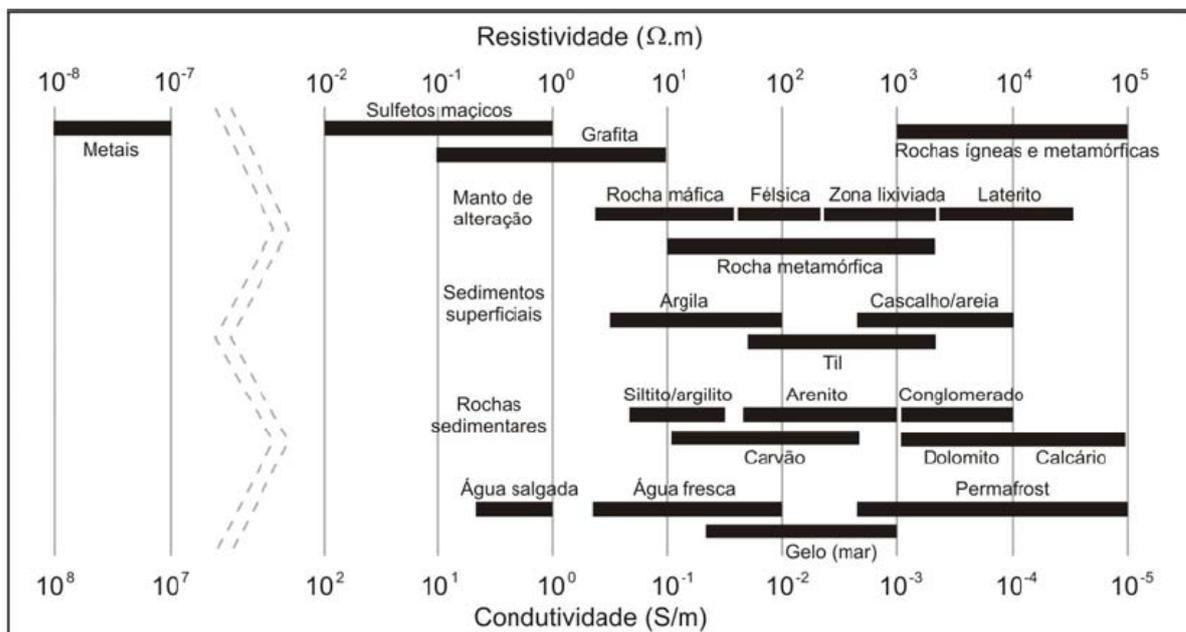
Retrata Lima (2014) que o recíproco da resistividade elétrica é a condutividade elétrica, decorrente da sua natureza e estado físico de um material, sendo assim a sua resistividade elétrica se dá como a facilidade com que se transportam cargas elétricas através de campos elétricos externos. Já a condução como um fenômeno, se classifica como eletrônico ou iônico e quem transportará as cargas serão elétrons ou íons. Minerais metálicos podem conduzir eletricidade via a passagem de elétrons, geralmente, os minerais formadores de rochas são isolantes e compreende os valores de resistividade elétrica em rochas sãs como “altas anomalias resistivas” sendo assim, as rochas conduzem eletricidade por processos eletrolíticos mais que por processos eletrônicos (ORELLANA, 1972).

Uma das vantagens desse método é que sua rapidez e facilidade, obtendo resultados satisfatórios se bem ajustados, e sua desvantagem assim dizendo seria

para detalhes onde se espera ter uma resolução espacial considerável. O método da eletrorresistividade conta com uma corrente elétrica sendo induzida no solo por meio de eletrodos A e B e a diferença de potencial elétrico resultante medido por outro par de eletrodos M e N (TELFORD; GELDART; SHERIFF, 1990).

Os métodos elétricos obtiveram um impulso nos últimos anos, para inúmeros trabalhos no Brasil principalmente em áreas de: geologia básica, hidrogeologia, geotécnica e geologia ambiental (BORGES, 2002, 2007). A aplicação de geofísica para passivos ambientais vem sendo cada vez mais empregada em problemáticas ambientais. Como a resistividade elétrica das rochas se sujeita a várias questões exteriores como água, porosidade, fraturamento, influenciando diretamente na resposta geofísica adquirida. Os exemplos de resistividade dos materiais geológicos conforme Figura 5.

Figura 5 – Diferentes tipos de materiais e suas respectivas resistividades e condutividades.



FONTE: retirado de Borges (2007).

Em suma, os métodos geofísicos elétricos conseguem caracterizar promissora e profundamente áreas em pilhas de rejeitos, mostrando resultados como o mapeamento das estruturas internas, que muitas vezes

associados a outros métodos geofísicos e se possível a investigação química com diversos tipos de ensaios. Isso permite obter resultados satisfatórios do método, podendo até prevenir ou remediar de melhor forma possível os impactos ambientais. Dessa forma, será utilizada a geofísica para um tipo de estudo prévio para mapear em subsuperfície a região do rejeito e podendo verificando locais de contaminação e traçar um plano melhor de recuperação da área.

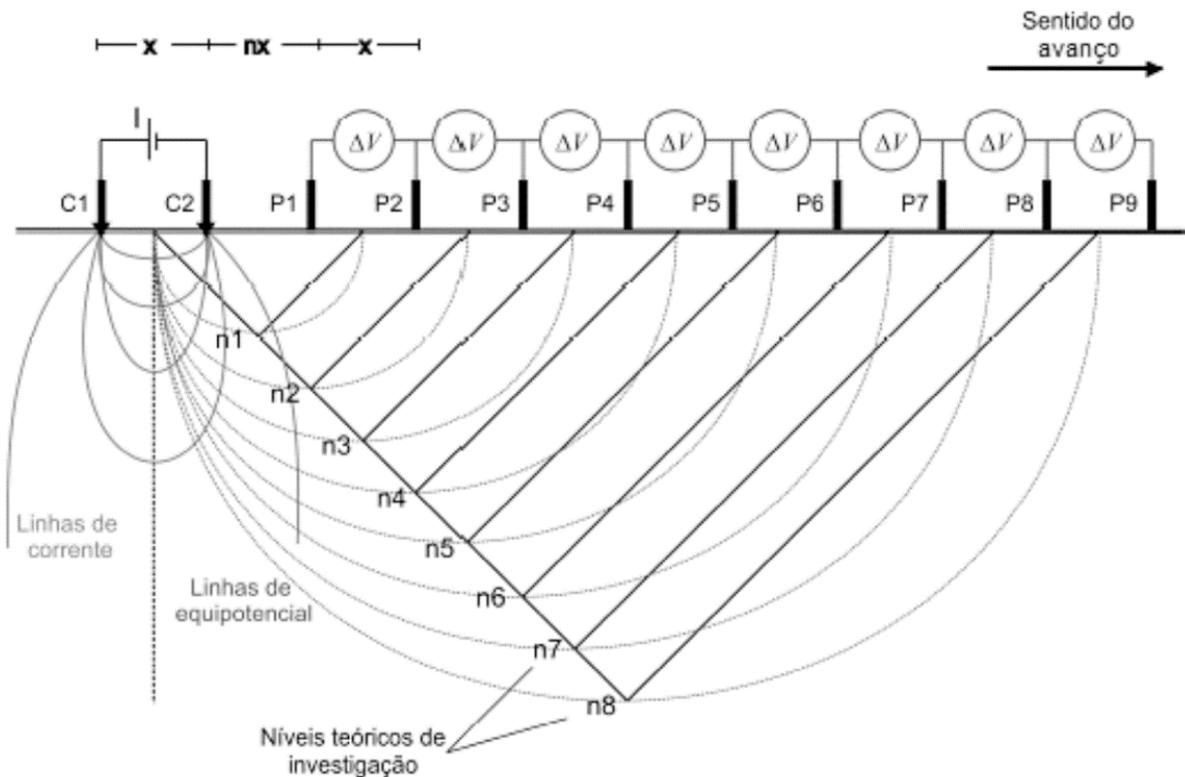
7 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo contou com aplicação geofísica do método eletrorresistividade e análise geoquímica, respectivamente.

Para a eletrorresistividade:

A ER servirá para as primeiras investigações da subsuperfície da área do rejeito na barragem, com cinco linhas de caminhamento elétrico por meio de arranjo dipolo-dipolo, com espaçamento de cinco metros entre os eletrodos, e com uma linha de 360 metros conforme Figura 6 podendo atingir uma profundidade entre 60 a 70 metros de profundidade.

Figura 6 – Esquema do arranjo dipolo - dipolo com a técnica caminhamento elétrico.



FONTE: extraído de KEAREY, *et al* (2002).

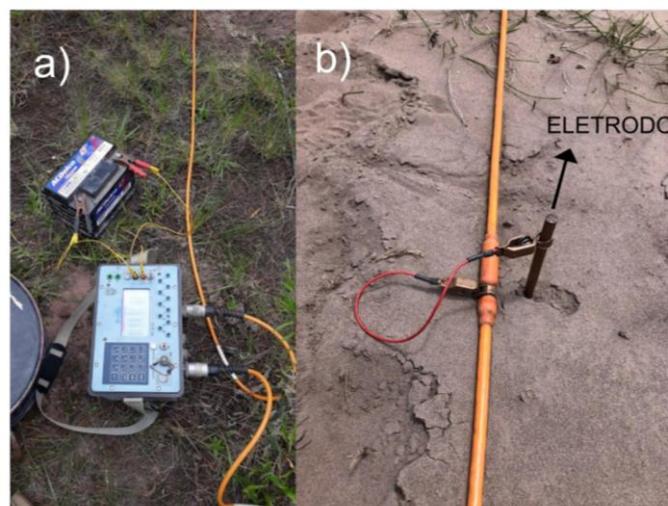
Os métodos utilizados buscam avaliar o perfil da barragem, e a profundidade do rejeito e utilizar a amostragem superficial e análise geoquímica para caracterizar o material de superfície da barragem de rejeitos.

7.1 Aquisição

As cinco linhas foram definidas em campo com auxílio de mapa de detalhe da área, devido à situação da barragem ser diferente das imagens de satélites e não se a barragem de rejeitos estaria de forma adequada para aplicação da geofísica. Buscou-se a aplicação de linhas para se obtivessem resultados em todas as porções da barragem.

O equipamento utilizado é o resistímetro modelo Syscal Pro de 10 canais fabricados pela IRIS Instruments (FRANÇA), de propriedade da Unipampa Caçapava do Sul. Para o estudo em questão, foi aplicada a técnica do Caminhamento Elétrico (CE), com arranjo dipolo-dipolo, que propicia uma análise em profundidade e lateralmente da resistividade elétrica, tendo como produto uma imagem 2D da subsuperfície, com uma linha de 360 metros com espaçamento dos eletrodos de cinco metros (Figura 7).

Figura 7 – a) Resistímetro modelo Syscal Pro e b) detalhe do eletrodo na linha.



FONTE: autora.

Seguimos o arranjo dipolo-dipolo (dipolos AB e MN são mutáveis; espaçamento dos eletrodos AB e MN são iguais; o dipolo MN nos da investigação em profundidade como visto anteriormente Figura 6, amplamente a técnica mais rápida e precisa para a situação, pois a geometria da aquisição é fundamental para alcançar as respostas desejadas, segundo a forma com que os eletrodos de corrente e potencial se dispõem, podem variar a investigação em subsuperfície (ORELLANA, 1972).

7.2 Processamento dos dados

O processamento dos dados de eletrorresistividade, neste caso, se dispõe em: eliminação dos dados espúrios, correção da inversão e RMS e por fim a interpretação de cada linha. É necessário isso para que os dados fiquem o mais real possível, eliminando o máximo os fatores externos que possam dificultar a visualização dos resultados (LOKE & BARKER, 1996). A partir do caminhamento elétrico, são convertidos os valores obtidos de resistividade aparente para obter um resultado mais fiel possível. Conforme retratou Loke e Barker (1996), é fundamental a eliminação de dados espúrios de eletrorresistividade para conseguir constatar melhor os dados brutos e pseudoseções de resistividade aparente, para isso filtra-se os dados segundo uma propensão dos dados.

A inversão gera um modelo de subsuperfície 2D com base em uma pseudoseção de resistividade aparente. E o RMS (root mean square) error é o erro que o programa gera a partir das interações da inversão do método de interpolação dos mínimos quadrados. Conforme Loke e Barker (1996), quando calculado o modelo, menor porcentagem se aproxima então da resistividade elétrica real.

Foi apresentado um mapa 2D detalhado com os resultados obtidos das cinco linhas (Figura 9 (b), Figura 11 (b), Figura 12 (b), Figura 13 (b), Figura 15 (b)) realizadas a partir desse método, para eventual comparação com análises químicas.

7.3 Amostragem da área

As cinco amostras adquiridas foram determinadas posteriormente aos resultados da eletrorresistividade, que em geral mostrou áreas com menor resistividade na parte superficial da barragem. Foram coletadas as amostras do rejeito superficial em quatro linhas (apenas a linha 5 não foi possível coletar por problemas secundários) e foram seguidas de análises geoquímicas de NAG, pH em pasta e Espectrometria de Fluorescência de Raios-X por Energia Dispersiva – EDXRF. As amostras foram retiradas com trado manual de duas polegadas em 2 metros de profundidade e com auxílio de uma pá de corte.

7.4 Ensaios estáticos

São destinados á caracterização do potencial de geração de acidez e alcalinidade das amostras, comumente usado na primeira etapa de determinação de DAM. Foram realizados os testes NAG e pasta de pH.

- NAG:

O ensaio NAG proposto por Miller *et al.* (1997) foi realizado a partir de uma amostra para reação química da mesma com o catalisador peróxido de hidrogênio (H_2O_2), para obter a oxidação imediata dos minerais sulfetados. O intuito desse teste é atacar quimicamente os sulfetos para ver se eles estão liberando H^+ ou OH^- . Simultaneamente ocorrem as reações de oxidação e neutralização, resultando na quantidade de ácido gerado, como um pH menor que 4,5 indica que a amostra está gerando ácido.

Nesse teste, pesa-se 2,5 gramas de cada amostra em duplicada em um Becker de 500 ml e acrescenta-se 250 ml da solução de 15% de H_2O_2 (com $4,5 < pH < 6,0$). Após reagir 24 horas na solução, ferve-se suavemente por 2 horas na chapa quente, deixa-se esfriar e mede-se o pH. Esse valor é o NAGpH. Por fim, titula-se com NaOH até pH 7 para encontrar a acidez total da amostra (procedimento descrito no anexo 1).

- PASTA DE pH:

A fim de obter as informações prévias sobre a reatividade dos minerais presentes em cada amostra, utilizará o procedimento de Sobek *et al.* (1978) para pH em pasta, partindo de uma pasta constituída de 10 gramas de rocha/rejeito (<60 mesh ou <0,25mm) e cerca de 5 ml de água destilada, posteriormente agitará por 10 minutos e espera-se 5 minutos aproximadamente para sedimentação das partículas. A água será adicionada suficientemente até o ponto de saturação (solo ficará com consistência moderada).

A parte que secará da amostra irá juntar-se com água deionizada na mesma proporção e mediu-se com o equipamento pHmetro para uma calibração de 4,00 – 7,00. Destina-se com isso a introduzir os eletrodos do equipamento dentro da pasta e agitar com delicadeza para homogeneizar-se.

Foram obtidos então o pH e condutividade elétrica na própria pasta de pH. Classificará então as que obtiverem respostas inferiores a 4,0 com potencial ácido (conforme anexo 2).

7.5 Espectrometria de Fluorescência de Raios-X por Energia Dispersiva (EDXRF)

Após as análises de pasta de pH e NAGpH, foram submetidas a análises através de Espectrometria de Fluorescência de Raios-X por Energia Dispersiva (EDXRF) no Laboratório de Lavra e Tratamento de Minérios (LATRAM) da Unipampa para identificação composição elementar.

Todas as amostras de retiradas do rejeito tiveram leituras em triplicatas, em que o com tempo médio de 120 segundos. Esse tipo de leitura é para que se suceda uma maior confiabilidade dos resultados. Esta técnica identifica os elementos, tanto de modo quantitativo quanto qualitativo.

Com esse método, é constatada a determinação da concentração de elementos, de forma imediata e de baixo custo (WASTOWSKI, *et al.*, 2010). Constata os raios-x emitidos por meio de um detector de silício que gera um

espectro de intensidade em função da energia a partir da excitação dos átomos dos elementos químicos. Essa intensidade emitida pelos componentes das amostras está ligada diretamente com a concentração de cada elemento presente nas amostras analisadas, na qual os resultados das composições das amostragens são por meio de planilhas, com resultados em porcentagem (%) e em partes por milhão (PPM) (KRUMMENAUER, 2017). Os resultados das cinco amostras das linhas 1, 2, 3 e 4 são retratados no apêndice 1.

8 RESULTADOS E DISCUSSÕES

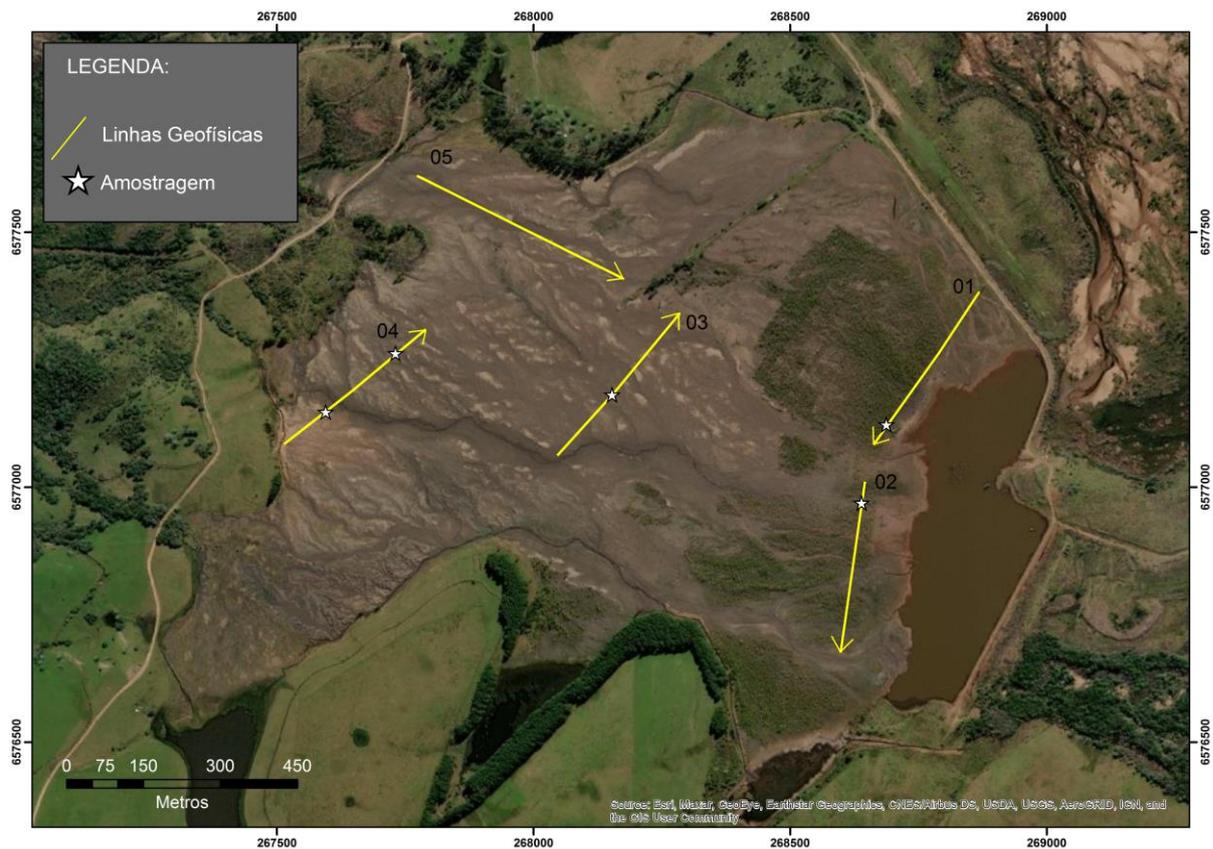
Nesta parte, será mostrada a análise geofísica que foi realizada e suas interpretações e a parte geoquímica, que por fim as considerações desses dados em conjunto para estabelecer uma melhor interpretação sobre a barragem de rejeitos da Minas do Camaquã.

8.1 Análise geofísica

A parte da interpretação das respostas geofísicas obtidas a partir da técnica da eletrorresistividade com caminhamento elétrico no arranjo dipolo-dipolo será disposta da seguinte forma: descrição da imagem, seguida da interpretação em profundidade. Cada imagem conta com 360 metros de comprimento e cerca de 90 metros de profundidade com esse tamanho de linha.

Conforme a metodologia escolhida, foram realizadas cinco linhas, definidas na etapa de campo, de forma estratégica para abranger a maior área possível da barragem de rejeitos. As localizações das linhas de eletrorresistividade estão na Figura 8, onde é indicado local de amostragem realizada.

Figura 8 – Distribuição das linhas de eletrorresistividade (amarelas) e pontos de amostragem localizados (estrelas).

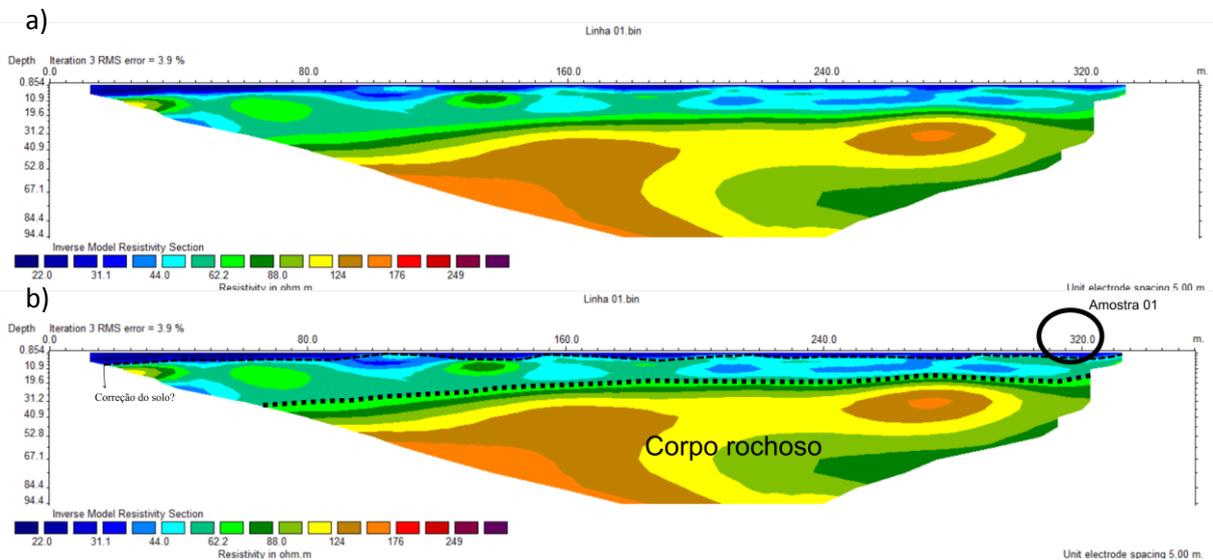


FONTE: modificado de IBGE, 2009.

Linha 1:

A linha 1 (Figura 9) fica localizada na porção NE da barragem de rejeitos, o início da linha começa na direção NE e termina em NW.

Figura 9 – (a) Perfil de caminhamento elétrico (linha 1) para o arranjo Dipolo-Dipolo e (b) local da amostragem realizada e interpretação feita a partir dos resultados obtidos.



FONTE: autora.

Essa área da barragem apresenta uma plantação de Pinus, provavelmente parte de uma recuperação da área, também está uniforme o rejeito da barragem e planejado conforme Figura 10. A área mais próxima a superfície, entre 0 a 10,9 metros, se observa uma fina camada de baixa resistividade (de 22 até 62,2 ohm.m). Pode significar que seja um rejeito com características modificadas devido a estar em meia plantação de Pinos.

Na porção de 10,9 até 31,2 metros em profundidade, ocorrem pequenas anomalias circulares no decorrer da linha, com valores de resistividade que variam de 44 ohm.m até aproximadamente 90 ohm.m. Nisso, podemos observar que as características menos resistivas (do rejeito) podem estar até 31,2 metros de profundidade, ou pelo menos parte desse rejeito.

É possível observar uma anomalia que corta toda a seção horizontalmente e de forma contínua com resistividade de 62,2 até 124 ohm.m, separando em duas áreas principais: a parte superior menos resistiva, e a parte inferior com resistividades elevadas. Essa camada pode ser a divisão entre o que é um corpo rochoso do material de superfície, porque os valores de resistividades mudam de forma significativa.

Figura 10 – Situação da linha 1, foi realizada em meio a tentativa de recuperação com plantação de pinos, que se encontram subdesenvolvidos.

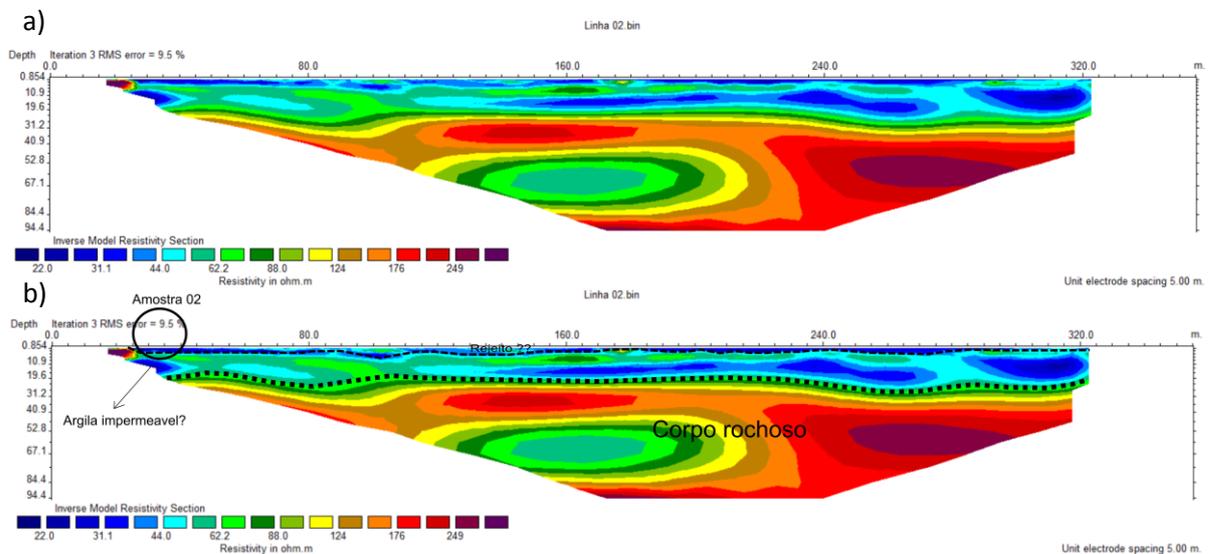


FONTE: autora.

Linha 2:

A linha 2 (Figura 11) está localizada na porção SE da barragem de rejeitos, tem direção aproximada N-S, com início N e término S, também apresenta outra porção de plantações de Pinos. Essa parte é possível ver uma camada de rejeitos sem ser plana, pode-se ver até algumas ravinas.

Figura 11 – (a) Perfil de caminhamento elétrico (linha 2) para o arranjo Dipolo-Dipolo e (b) local da amostragem realizada e interpretação feita a partir dos resultados obtidos.



FONTE: autora.

Nesta seção ocorrem anomalias semelhantes a linha 01, com valores baixos de resistividade próximos a superfície (variando de 22 até 44 ohm.m). Por estarem em meio à plantação de Pinos, pode se verificar um comportamento similar com da linha anterior, em que se encontram menores resistividades na porção superficial.

No início da linha vemos uma anomalia circular alongada com núcleo de 44 ohm.m e bordas de até 66 ohm.m. Do meio pro final da linha, entre 130 metros se tem uma anomalia bem marcada (31 ohm.m) de forma alongada que se estende até 280 metros, e no final da linha também é possível ver uma anomalia circular com núcleo de até 22 ohm.m.

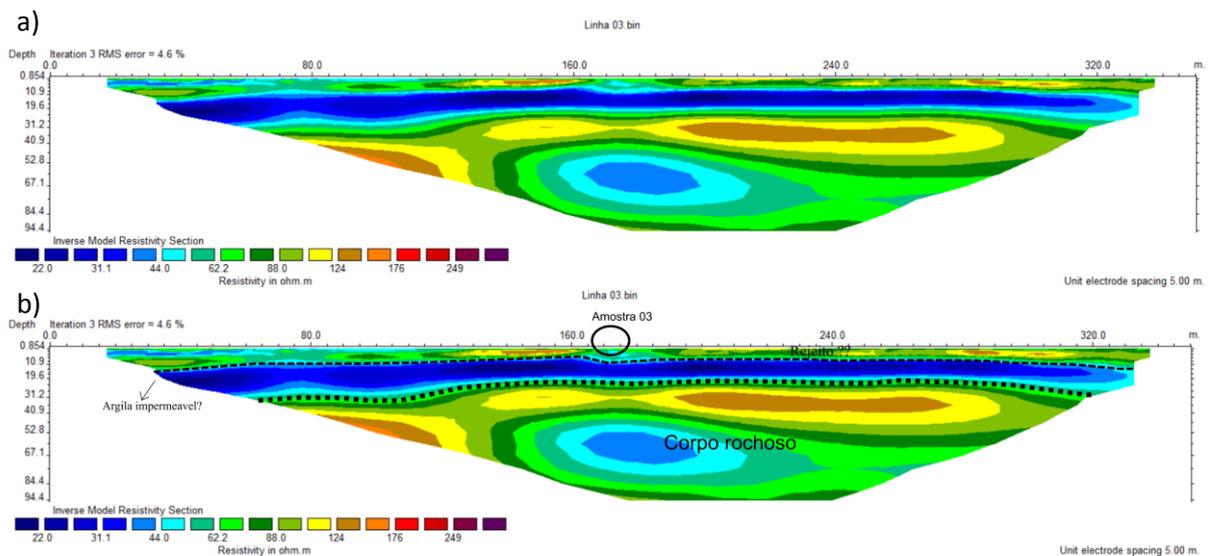
A mesma camada horizontal, com profundidade intermediária, identificada na linha 1, está também visível separando em partes a seção, sendo a mais inferior e profunda de corpo rochoso devida sua resistividade discrepante da parte superior da seção. A parte mais profunda, abaixo dessa anomalia horizontal, é marcada por três núcleos de anomalias, dois destes são circulares pouco alongados com núcleos de porções mais resistivas, a menor está no meio da linha, circular e alongada com núcleo central de 176 ohm.m; a segunda, semelhante a essa se encontra no final da linha, depois de 240 metros com núcleo maior que 300 ohm.m. Abaixo da anomalia

menor, é possível ver uma anomalia circular maior, com centro menos resistivo de 62,2 ohm.m e as bordas mais resistivas.

Linha 3:

Esta linha 3 (Figura 12) foi definida no centro da barragem de rejeitos, tem início na direção NE e termino em SW. É uma parte planificada, seca e não se encontram plantações.

Figura 12 – (a) Perfil de caminhamento elétrico (linha 3) para o arranjo Dipolo-Dipolo e (b) local da amostragem realizada e interpretação feita a partir dos resultados obtidos.



FONTE: autora.

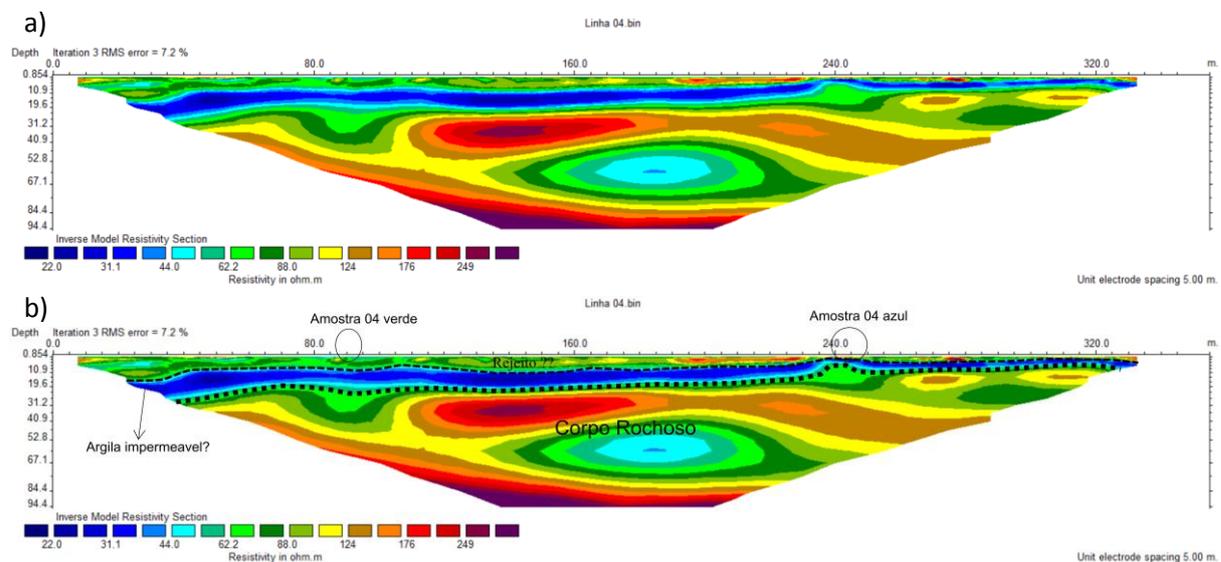
Nesta linha ocorre uma anomalia alongada horizontalmente entre 10,9 metros até 31,2 metros de profundidade, com núcleo pouco resistivo (22 ohm.m), essa anomalia corta toda a seção. A parte superficial acima dos 10,9 metros de profundidade, se mostra com comportamento diferente das linhas 1 e 2, com valores de resistividade mais altos (variando de 62.2 ohm.m até 88 ohm.m). Essa parte poderia ser considerada como uma camada de argila impermeável, pelos valores de resistividade bem menor que a porção superior e inferior.

Encontra-se também a mesma camada horizontal contínua presente nas linhas 1 e 2, separando em duas porções a seção. Na parte inferior dessa camada são observadas três anomalias, a mais profunda em torno de 160 metros de linha, de forma circular com núcleo de 44 ohm.m, e bordas de 88 ohm.m, e duas anomalias superiores a essa, de forma circular alongada, do meio para o final da linha, com núcleo de 124 ohm.m. Essa parte mais inferior, foi considerada parte do corpo rochoso, devido seus valores de resistividades. A parte mais superficial da linha, pode ser considerada rejeito, conforme valores distintos de resistividade.

Linha 4:

Foi aplicada na parte oeste da barragem, com início na direção NE e termino em SW (Figura 13). Estamos em uma parte da barragem mais alta e acidentada (Figura 14), com presença de uma porção mais úmida, que pode ser um caminho preferencial de escoamento da água.

Figura 13 – (a) Perfil de caminamento elétrico (linha 4) para o arranjo Dipolo-Dipolo e (b) local das duas amostragens realizadas e interpretação feita a partir dos resultados obtidos.



FONTE: autora.

A superficial apresenta com resistividades que variam entre 62,2 a 88 ohm.m, e algumas porções com resistividades mais altas (em 180 metros de linha é possível ver uma anomalia alongada pouco espessa com núcleo de 176 ohm.m, e uma

pequena anomalia por volta de 280 metros da linha bem marcada com núcleo até 249 ohm.m). Pode se considerar como camada de material do rejeito devido seus valores de resistividades.

É visível a mesma anomalia da linha 3, de forma alongada e horizontalizada na profundidade 19,6 metros, possui valores baixos de resistividade que corta toda seção, no inicio da linha é mais espessa e chegando em 240 metros está mais superficial. Pode se considerar que seja uma camada argila impermeável. Também apresenta a mesma camada que separa a seção em duas partes, visualizadas nas linhas 1, 2 e 3.

Observaram-se duas anomalias profundas bem marcadas, uma mais superior e mais resistiva, e outra mais profunda e com núcleo menos resistivo, ambas são circulares e pouco alongadas e estão no meio da linha. A menos resistiva tem seu interior de 44 ohm.m e bordas de 88 ohm.m, esta mais profunda, e a mais resistiva, está acima, e apresenta em seu interior 300 ohm.m e bordas com 124 ohm.m. Essa camada inferior interpretada como corpo rochoso devida características da resistividade bem distinta da parte superficial e intermediária.

Figura 14 – Linha 4 em parte da barragem de rejeitos sem plantações, representa a maior parte da barragem.

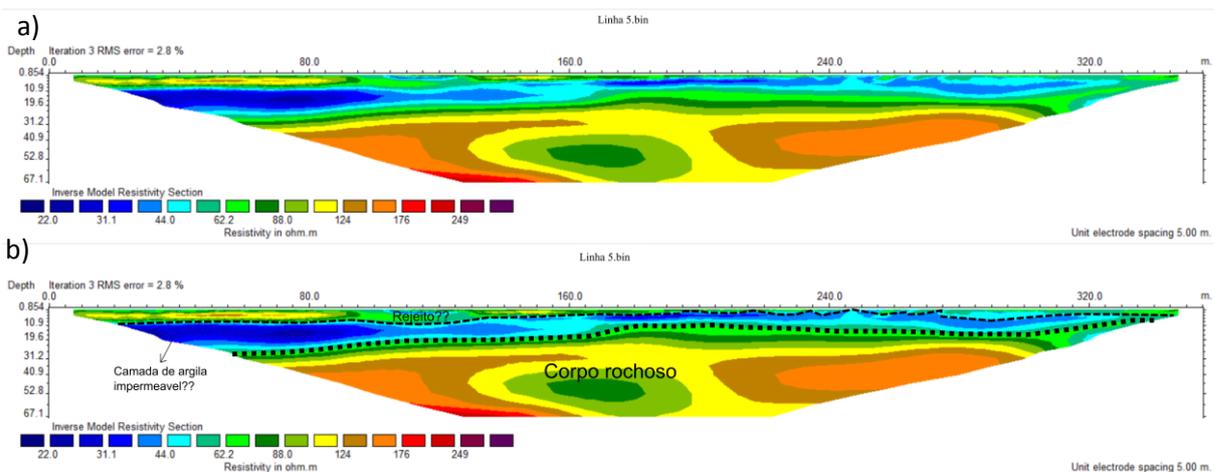


FONTE: autora.

Linha 5:

Essa linha foi realizada na parte NW, com início em NW e final da linha SE. Essa parte da barragem se encontra sem presença de vegetações e de forma bem planejada (Figura 15).

Figura 15 – (a) Perfil de caminamento elétrico (linha 5) para o arranjo Dipolo-Dipolo e (b) interpretação feita. Não foi possível amostrar nessa linha.



FONTE: autora, 2022.

É possível identificar uma camada semelhante com as linhas 3 e 4, horizontalizadas e de valores pouco resistivos, no início da linha esta mais profunda e no final, mais superficial. Indicando na figura 15 (b) uma possível camada impermeável de argila, já descrita nas linhas 3 e 4.

A porção mais profunda existe uma anomalia circular na parte central de 88 ohm.m, indicando uma porção menos resistiva que o meio envolvente 124 a 176 ohm.m. Ainda é possível ver a mesma anomalia horizontalizada continua das linhas 1, 2, 3 e 4 com valores intermediários, separando em duas porções, a superior é menos resistiva e a mais profunda mais resistiva.

As linhas 3, 4 e 5 foi possível identificar uma camada bem marcada de menor resistividade, podendo ser de uma argila impermeável em que os rejeitos foram dispostos segundo Bruch (2014). Já as linhas 1 e 2 não se observam essas

camadas bem marcadas, porém estão em áreas “revegetadas” o que pode ter alterado as características superficiais do rejeito. As plantações de *Pinus elliotii* para revegetação denominada “cortinas verdes” estão em aproximadamente 9,55% da área da barragem de rejeitos (BRUCH, 2014), usada para fins de reter as partículas sólidas para evitar o carreamento pelo ar, essas plantações tem mais de 30 anos de idade e estão de em grande parte subdesenvolvidas.

Além da delimitação de camadas em subsuperfície, a geofísica também foi de grande importância para realizar algumas suposições. Por exemplo, alguns passivos ambientais, como a DAM, não parece estar presente na barragem, visto que não apresentam os limites de resistividade para sulfetos (como visto na Figura 5) onde as argilas e siltitos correspondem a resistividade de 10^1 ohm.m, já os sulfetos maciços caso aparecessem, estariam na faixa de 10^{-2} a 10^0 ohm.m (podendo indicar áreas de contaminações).

9.2 Amostragem e análise química:

As amostras foram retiradas conforme a metodologia, com um trado de até 2 metros de profundidade. Cada amostra foi retirada conforme as limitações impostas pelo equipamento disponível. A partir da Tabela 3 é caracterizada como foi feita a coleta do material superficial na barragem de rejeitos.

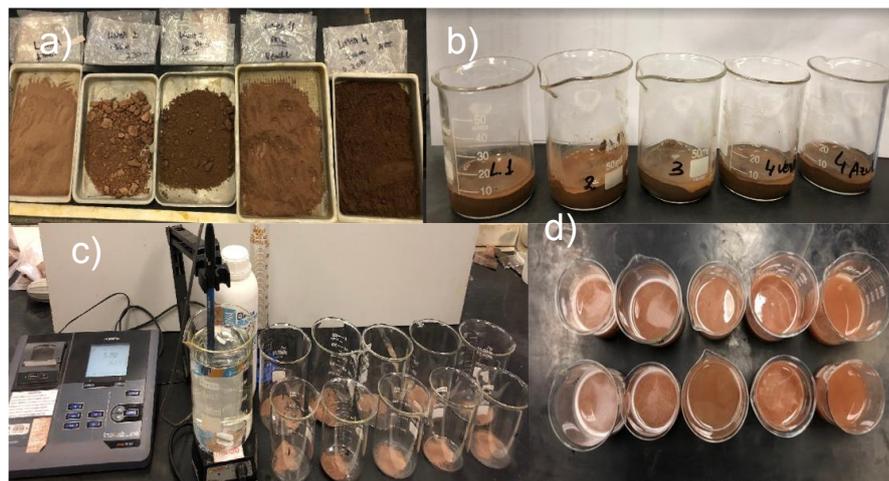
Tabela 3 – Resumo da amostragem realizada nas linhas 1, 2, 3 e 4.

AMOSTRA 1 FINAL	AMOSTRA 2 INICIO	AMOSTRA 3 MEIO	AMOSTRA 4 VERDE	AMOSTRA 4 AZUL
Alaranjada	Acinzentada e alaranjada	Acinzentada	Acinzentado	Alaranjada
Areia fina e pouca presença de água	Argilosa com muita presença de água	Areia fina e argila, com água	Areia fina e argila com água	Muito fina com água
~1,30m	~2,08m	~1m	~2,08m	~2,08m

FONTE: autora.

As análises foram realizadas no Laboratório de Tecnologia Mineral e Ambiental (LTM) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul a partir da preparação das amostras coletadas na barragem de rejeitos da antiga Mina do Camaquã. A partir da Tabela 4 é possível observar os resultados obtidos da pasta de pH (pH e condutividade) e também o NAGpH realizado através do teste NAG e os procedimentos realizados (Figura 16). Para realização dos testes, as cinco amostras foram destorroadas, quarteadas e moídas a uma granulometria inferior a 0,25mm.

Figura 16 – Procedimentos realizados (a) etapa preparação para quarteamento, (b) pH em pasta, (c) para teste NAG e em (d) após adição do peróxido de hidrogênio.



FONTE: autora.

Os resultados do pH em pasta variaram entre 8,5 e 8,9, caracterizando o material com pH básico. Para o teste NAG, observou-se que após a primeira adição de H_2O_2 as amostras 2, 4 verde e 4 azul reagiram vigorosamente, a amostra 3 moderadamente e a apenas a 1 não reagiu momento adição, na chapa aquecida, todas começaram reagir por aquecimento. Na medida do NAGpH, todas as medidas foram acima de 7, por isso não houve titulação com NaOH. Assim, em ambos os testes, as amostras demonstraram caráter básico e com potencial de neutralização.

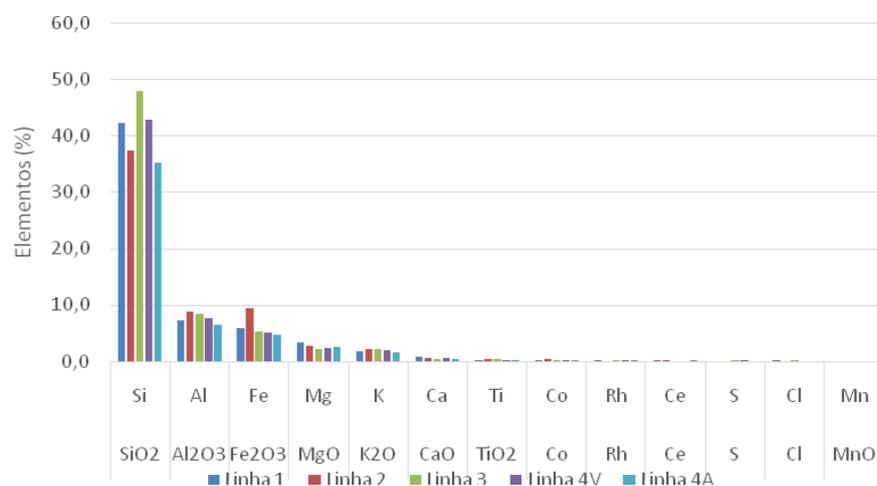
Tabela 4 – Resultados obtidos a partir do teste de pH em pasta e NAGpH.

AMOSTRAS	pH em pasta	Condutividade	NAGpH
1	8,5	147	8,5
2	8,7	129	8,3
3	8,9	115,5	7,9
4 VERDE	6,7	230,6	7,6
4 AZUL	8,6	129,6	8,1

FONTE: autora.

A fim de confirmar as características básicas do material, foi necessária a análise do tipo elementar, para entender o comportamento básico das amostras. O Gráfico 1 apresenta os resultados obtidos para as cinco amostras analisadas. Para todas elas foi possível identificar Si, Al, Fe, Mg e K como componentes majoritários e alguns outros elementos em menores quantidade, mas pouca ou inexistente presença de Pb, Cu a partir do método analisado. Fleck e Zago (2013) por dados estimados obtiveram o teor médio de 0,06% de cobre na barragem, o que também é um valor considerado baixo.

Gráfico 1 – Elementos encontrados em % pelo EDXRF.



FONTE: autora.

A grande quantidade de sílica nas quatro linhas analisadas e também presença de alumínio, ferro, magnésio e potássio em menor quantidade indica fortemente a presença de minerais silicatados nas amostras. O quartzo é um dos minerais abundantes na região (já que a região do minério está em arenitos e conglomerados). Outros minerais que podem estar presentes a partir dessa composição elementar e gerando alcalinidade são olivina, epidoto, micas, plagioclásios e feldspatos. Na Tabela 5 apresentam-se alguns minerais que geram acidez e alcalinidade, e se há indícios de sua presença nas amostras.

Tabela 5 – Compostos minerais que gerariam acidez e/ou consomem alcalinidade nas amostras observadas.

COMPOSTOS MINERAIS	GERAÇÃO DE ACIDEZ/ALCALINIDADE	INDICAÇÃO DE PRESENÇA NAS AMOSTRAS
Sulfetados (Fe-sulfetos, outros)	ACIDEZ	Não
Carbonatos e diferentes silicatos, óxidos de Fe e Al ex: olivina, epidoto, mica, plagioclásio, feldspato	CONSUMIDORES DE ACIDEZ/ GERADORES DE ALCALINIDADE	Sim
Quartzo	INERTE	Sim

FONTE: autora.

Por fim, cabe ressaltar que, mesmo não sendo identificados indícios de geração de DAM, a barragem de rejeitos é um passivo ambiental. Os rejeitos se encontram dispostos na barragem, que ocupa uma grande área (aproximadamente 1.500.000 m²) que visivelmente não foi recuperada de forma adequada. Parte considerável da barragem não possui cobertura vegetal, ou vegetação com crescimento deficiente (BRUCH, 2014), onde o solo fica exposto. Isso pode ser observado em campo. O rejeito está sujeito a processos erosivos e aumento do aporte de sedimentos para corpos hídricos próximos, além de possibilidades de geração de poluição atmosférica devido ao material particulado em suspensão da área.

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da geofísica foi possível identificar a distribuição interna de camadas que compõe a barragem de rejeitos, com diferenças significativas de pelo menos três camadas. A mais superficial e com resistividade menor (de 30 a 60 ohm.m) caracteriza o material do rejeito da barragem em si, variando em espessura e chegando até 10 metros de profundidade. Já as camadas identificadas abaixo, há indícios de um material mais argiloso (de 22 ohm.m) e logo abaixo o corpo rochoso (valores maiores que 88 ohm.m), correspondente a arenitos e conglomerados que compõe a região. Além disso, não foi possível identificar limites de resistividades para sulfetos, que estariam na faixa de 10^{-2} a 10^0 ohm.m e poderiam indicar áreas com potencial de geração de acidez. Esses resultados foram corroborados pelos ensaios geoquímicos.

O pH medido pelo pH em pasta não se apresenta ácido, assim como os resultados obtidos pelo teste NAG: todas as amostras resultaram pH próximo a 8 em ambos testes. A análise elementar apresenta como componentes majoritários Si, Al, Fe, Mg e K, indicando presença de componentes silicatados e óxidos de Fe e Al e carbonatos. Esses minerais são inertes ou possuem tendência à geração de alcalinidade, o que justificou os resultados obtidos.

Assim, esse estudo pôde caracterizar o perfil em profundidade da barragem de rejeitos das Minas do Camaquã utilizando a combinação do método geofísico e ensaios geoquímicos. O estudo apresentou a distribuição de diferentes camadas de eletrorresistividade em subsuperfície e aspectos relevantes quanto à geração de acidez/alcalinidade do material que compõe a barragem.

10 ESTUDOS FUTUROS

- Para melhor compreensão, sugerem-se estudos de análise mineralógica por Difratorômetro de Raios-X (DRX), na qual fornece a composição mineralógica para caracterização dos minerais que ainda estão rejeito;
- Realizar mais tipos de amostragem e em maiores profundidades, para isso é necessário um equipamento que alcance profundidades superiores a 2 metros;
- Análise de fertilidade (macro e micronutrientes) nos primeiros 50 cm de material superficial;
- Ensaio do estático de Balanço Ácido – Base (ABA) para contabilizar as quantidades de substâncias geradoras e neutralizados de ácido presentes no resíduo e complementar os testes de NAGpH e pH em pasta;
- Realizar mais ensaios geofísicos para mapear a área da barragem em 3D e até outros métodos como indução polarizada (IP).

REFERÊNCIAS

- ABNT. Associação Brasileira de Normas de Técnicas NBR 10.004: **Resíduos sólidos – Classificação**. 2004. Rio de Janeiro. 77p.
- ABIB, P. **Projeto expansão Camaquã**. Caçapava do Sul, 1979.
- ALMEIDA, F.F.M.; HASUI, Y. **Província Mantiqueira-Setor Setentrional**. 1984 In: O Pré-Cambriano do Brasil. Editora Edgard Blucher, p. 282-307.
- ANM, **Agência Nacional de Mineração**, 2016.
- BADI, W. S.R., GONZALEZ, A. P. Jazida de metais básicos de Santa Maria, Caçapava do Sul-RS. Principais depósitos Minerais do Brasil, v. 3, p. 157-170, 1998.
- Borma, L. S.; Soares, P. S. M. **Drenagem Ácida e Gestão de Resíduos Sólidos de Mineração**. In: Emery Trindade, R. B.; Barbosa Filho, O. (Ed.). Extração de Ouro: Princípios, Tecnologia e Meio Ambiente. Rio de Janeiro: CETEM/MCT. 2002. Cap. 10, p.253-27.
- BRUCH, A. F. **A mineração e a paisagem geoquímica na Sub-Bacia Hidrográfica Arroio João Dias Minas do Camaquã, Caçapava do Sul, RS**. 303 f. Tese de doutorado. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre 2014.
- BORGES, W. R. **Investigações geofísicas na borda da bacia sedimentar de São Paulo, utilizando-se GPR e eletrorresistividade**. Dissertação (Mestrado em Geofísica) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, doi:10.11606/D.14.2002.tde-26042004-112913. Acesso em: 17/09/2021. 2002.
- BORGES, W. R. **Caracterização geofísica de alvos rasos com aplicações no planejamento urbano e meio ambiente: estudo sobre o sítio controlado do IAG/USP**. Tese (Doutorado em Geofísica) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, doi:10.11606/T.14.2007.tde-28102007-133400. Acesso em: 2021-09-17. 2007.
- BIZZI, Luiz Augusto; SCHOBENHAUS, Carlos; VIDOTTI, Roberta Mary; GONÇALVES, João Henrique (ed.). **Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil: texto, mapas e SIG**. Brasília: CPRM, 2003. Escala 1:2.500.000. Sistema de Informações Geográficas - SIG.
- CAMPANER, V. P., SILVA, W. L. **Processos físico-químicos em drenagem ácida de mina em mineração de carvão no sul do Brasil**. Quim. Nova, vol 32, No 1, PP 146-152, 2009.

CONAMA, **Conselho Nacional de Meio Ambiente**. Resoluções nº 335/2003, nº 368/2006. Brasília.

CHEMALE JUNIOR, F. **Evolução geológica do Escudo Sul-Riograndense**. In: HOLZ, M.; DE ROS, L. F. (Eds.). Geologia do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000. P. 13-52.

DAVIES, M. P.; McROBERTS, E.; MARTIN, T. **Static liquefaction of tailings: fundamentals and case histories**. In: AMEC Earth e Environmental. Vancouver and Edmonton, 2002.

DAVIES, M. P. e MARTIN T. E. **Upstream constructed tailings dams - A review of the basics**. Tailings and Mine Waste 00. Colorado, USA, A.A. Balkema, Rotterdam: pp. 3-15. 2000.

DNPM, **Departamento Nacional de Pesquisa Mineral (Brasil) Cobre, Balanço Mineral Brasileiro 2001**. <https://dnpm-pe.gov.br/Legisla/cm_01.htm> ACESSO em: 13/09/2021.

DUARTE, A. P. **Classificação das barragens de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos industriais no estado de Minas Gerais em relação ao potencial de risco**. Dissertação de mestrado apresentada a Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG, 2008.

FRAGOSO-CESAR, A. R. S. **Estratigrafia do Supergrupo Camaquã (Ediacarano do Rio Grande do Sul)**. I Semana Acadêmica Integrada UNIPAMPA. Caçapava do Sul – RS, 2016. 14.

FLECK, A C. B.; ZAGO, L. E. **Estudo e caracterização para o reaproveitamento do rejeito remanescente da mineração de cobre das Minas do Camaquã Caçapava do Sul – RS**. Trabalho de Conclusão de curso – Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul, p. 107. 2013.

FERREIRA, I. D. **Gerenciamento de Resíduos de Serviços de Saúde: Orientações para os Serviços em Odontologia**. Juiz de Fora/MG, 2014;

FOX-PARBHAKAR, A. **Establishing the value of na integrated geochemistry-mineralogy-texture approach for acid rock drainage prediction**. University of Tasmania, 2012.

GRAY, N. F. 1997. **Environmental impact and remediation of acid mine drainage: a management problem**. Environmental Geology, v.20, 1997.

GOOGLE EARTH PRO - MAPAS, **Software Google Earth** versão 7.1.8.3036. 2017.

GUARD GUIDE ACID ROCK DRAINAGE (GARD), Disponível em: <http://www.gardguide.com/index.php?title=Main_Page> acesso em 27 ago 2021.

HARRES, M. M. **Minas do Camaquã (Caçapava do Sul, RS): A Exploração do Cobre no Rio Grande do Sul. 2000** In: **Minas do Camaquã, um estudo multidisciplinar**. Organizado por Luiz Henrique Ronchi e Anderson Orestes Cavalcante Lobato. São Leopoldo: Ed. Unisinos, cap. 1, p. 21 - 53.

HARTMANN, L. A.; CHEMALE Jr., F.; PHILIPP, R. P. **Evolução geotectônica do Rio Grande do Sul no Pré-cambriano**. 2007. In: IANUZZI, R.; FRANTZ, J.C. (Org.). In: 50 anos de Geologia. 1 ed. Instituto de Geociências, Porto Alegre. Editora Comunicação e Identidade, v. 1, p. 97-123.

IBGE- **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, “IBGE, 2006”**. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/mapa_site/mapa_site.php#geociencias>. Acesso em: 27 de ago 2021.

IBRAM. **Instituto Brasileiro de Mineração Gestão e Manejo de Rejeitos de Mineração**. Relatório disponível em: <http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00006222.pdf>. 2016

KRUMMENAUER, A., **Desenvolvimento e Validação de Metodologia Analítica para Análise de Aços por Espectrometria de Fluorescência de Raios X por Dispersão de Energia (EDXRF)**, 88 f., Dissertação (Mestrado em PPGE3M), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

KEARY, P., BROOKS M., HILL I. **Geofísica de Exploração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009 .p. 315

KOPENZINSKI, I. **Mineração x Meio Ambiente: Considerações Legais, Principais Impactos Ambientais e seus Processos Modificadores**, Porto Alegre: Ed. Universidade/ UFRGS, 2000, 103 p.

KONTOPOULOS, A. **Acid Mine Drainage Control**. In: CASTRO, S.H. etalii. (Eds.). *Effluent Treatment in the Mining Industry Chile: University of Concepción*, p.57-118, 1998.

LAUX, J. H. **Caracterização da mineralização cupro-aurífera de uma parte da mina Uruguai, Rio Grande do Sul**. Pós-Graduação em Geologia. UNISINOS. Tese de doutorado. Dissertação de Mestrado, 1999.

LAUX, J. H.; LINDENMAYER, Z. G. **As Minas do Camaquã: um século de evolução de hipóteses genéticas**. 2000. In L. H. Ronchi & A. O. C. Lobato (ed.) *As Minas do Camaquã*. São Leopoldo, Editora UNISINOS, p. 133-164.

LAYBAUER, L. **Análise das transferências de metais pesados em águas e Sedimentos fluviais na região das Minas do Camaquã, RS**. 1995. 164f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Curso de Pós-Graduação em Geociências, Porto Alegre, 1995.

LOKE, M.H; BARKER, R.D. **Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton methods**. Geophysical Prospecting, n. 44, p. 31- 152, 1996.

LUZ, A. B., SAMPAIO, J. A., ALMEIDA, S. L. M. **Tratamento de minérios**. 2004. 4. ed.rev.amp. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 867p. Disponível em: < <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/2042> > acesso em: 27/08/2021.

MARTIN, T.E. e MCROBERTS E.C. **Some considerations in the stability analysis of upstream tailings dams**. Tailings and Mine Waste. 2002.

MELLO, J.W.V.; DUARTE, H. A.; LADEIRA, A. C. Q. **Origem e Controle do fenômeno Drenagem Ácida de Mina. 2014. Cadernos temáticos de Química Nova**. Disponível em: <<http://qnesc.sbq.org.br/online/cadernos/08/0-CTN4.pdf>> Acesso em 12 de ago. de 2021.

MILANEZ, B. **Mineração, ambiente e sociedade: impactos complexos e simplificação da legislação**. Boletim regional, urbano e ambiental | 16 | jan.-jun. 2017, IPEA.

MILARÉ, E. 2004. **Direito do ambiente: doutrina, jurisprudência, glossário**. 3.ed. São Paulo: Ed. Revista dos Tribunais.

MILLER, B. G. **Wastewater Engineering: treatment, disposal and reuse**. New York: McGraw-hill. 1334p. 2005

MESQUITA, P. P. D, CARVALHO, P. S. L, OGANDO, L. D. **Desenvolvimento e inovação em mineração e metais**. BNDES Setorial, p. 325-261, 2016

NIERWINSKI, H. P. **Caracterização e Comportamento Geomecânico de Rejeitos de Mineração**. 2019. Tese de Doutorado (Doutorado em Engenharia Civil) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

ORELLANA, Ernesto. **Prospeccion geoelectrica: en corriente continua**. 2. ed. Espanha: Paraninfo, 1972.

PAIM, P. S. G. Minas do Camaquã, RS - **Marco da história da mineração de cobre no Brasil**. 2002. In: SCHOBENHAUS, C.; CAMPOS, D.A.; QUEIROZ, E.T.; WINGE, M.; BERBERT-BORN, M.L.C. (Edits.). Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil, 1ª Ed, Brasília: DNPM/CPRM - Comissão Brasileira de Sítios Geológicos e Paleobiológicos (SIGEP), v.01, p. 501-510.

PAIM, P. S. G., LOPES, R. C. **Geologia da Região das Minas do Camaquã**. Minas do Camaquã. Porto Alegre: Editora Unisinos, 2000b. 366p.

PAIM, P. S. G., CHEMALE JR. F., LOPES, R. C. **A Bacia do Camaquã**. In M. Holz & L. F. De Ros (Eds) Geologia do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Editora UFRGS, 2000 a.

Pereira, S. Y. **Impacto da Drenagem ácida na Água Subterrânea.** In: **Alba, J.M.F.: Recuperação de áreas mineradas.** 2a Ed. Brasília DF. Embrapa informação tecnológica. 2010. 326 pág.

REMUS, M. V. D. **Metalogênese dos depósitos hidrotermais de metais-base e Au do ciclo Brasileiro no Bloco São Gabriel, RS.** 1999. Unpublished PhD Thesis. Curso de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 167 p.

SOBEK, A. A. *et al.* **Field and Laboratory Methods Applicable to Overburdens and Mineseils.** Cincinnati, Ohio: Industrial Environmental Research Laboratory Office. U.S. Environmental Protection Agency, 1978.

SOUZA, V. C. **Estudo das técnicas de disposição de rejeitos de mineração, 2018. Trabalho de conclusão de curso.** Universidade federal de Ouro Preto. Escola de Minas, departamento de Engenharia de minas. MG, 2018.

SANCHEZ, L. E. 2001. **Desengenharia: o passivo ambiental na desativação de empreendimentos industriais.** São Paulo: Ed. da Universidade de São Paulo.

SEGREDO, A. E. A. E. **Proposta de um sistema passivo para tratamento da drenagem ácida de mina gerada no depósito de rejeitos de capão da roça, charqueadas/RS – COPELMI MINERAÇÃO LTDA.** Dissertação de mestrado em engenharia, UFRGS, 2014. Disponível em: < <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/143599/000981481.pdf?sequence=1> > Acesso em: 12/09/2021.

TEIXEIRA, G.; GONZALES, M. **Minas do Camaquã, Município de Caçapava do Sul, RS.** 1988. In: C. SHOBHENHAUS. Principais depósitos Mineraiis do Brasil, Vol. III - Metais básicos não ferrosos e Alumínio, DNPM, p. 34-40.

TELFORD, W. M; GELDART, L.P; Sheriff, R.E. **Applied Geophysics,** 2n edn. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

THOMÉ, R., RIBEIRO, L. G. G. **Descaracterização de barragens de rejeito e o plano de fechamento de mina como instrumentos de mitigação de riscos na mineração.** Veredas do Direito, Belo Horizonte, v.16 n.35 p.63-85 Maio/Agosto de 2019.

TRAVASSOS, R. P., DANTAS, E. L., BONIATTI, J. H., FRUCHTING, A., LAGO, S. B., TOMAZONI NETO, F., FREITAS, R. F. 2014. **Aeromagnetometria aplicada na interpretação estrutural regional do Escudo Sul-Rio-Grandense, RS.** In: VI Simpósio Brasileiro de Geofísica, 4. Porto Alegre. Anais, SBGf, Porto Alegre/RS, v. 1, pp. 1-5. 2014.

TRINDADE, A. DE O., SOARES, L. O., NETO, R. O., SOUZA, L. E., ABICHEQUER, L. A., GONÇALVES, I. G., CARON, F. **Caracterização dos rejeitos das minas do**

Camaquã para reaproveitamento sustentável. Revista Monografias Ambientais, Santa Maria, v. 14, Ed. Especial Unipampa. 2015, p. 116-132.

TROIAN, G. C. **A cloritização na Mina Uruguai, Minas do Camaquã/RS-Brasil. 2009. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, PPGG. Porto Alegre.**

VICK, S.G. **Planning, Design and Analysis of Tailings Dams.** John Wiley & Sons, Inc., 369 p, 1983.

WASTOWSKI, A. D.; ROSA, G. M. **Caracterização dos níveis de elementos químicos em solo, submetido a diferentes sistemas de uso e manejo, utilizando espectrometria de fluorescência de raios-x por energia dispersiva (EDXRF).** Química Nova, v.33, p.1449-1452, 2010.

APÊNDICES

APÊNDICE 1: Resultados obtidos através do EXRDF.

ID	Field 1	Mode	Type	Duration	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Co	Rh	Ce
1 Final	1	General	GeoChem General FP	120,70	2,47	7,28	41,6	0,09	0,19	1,86	0,88	0,33	0,05	5,84	0,26	0,22	0,18
1 Final	2	General	GeoChem General FP	120,80	4,67	7,28	41,9	0,11	0,19	1,86	0,86	0,31	0,06	5,8	0,28	0,21	0,17
1 Final	3	General	GeoChem General FP	120,80	3	7,23	43	0,11	0,19	1,86	0,66	0,3	0,05	5,82	0,26	0,21	0,13
2 Início	1	General	GeoChem General FP	120,60	1,52	8,42	37,1	0,15	0,09	2,34	0,63	0,47	0,1	9,5	0,46	0,19	0,29
2 Início	2	General	GeoChem General FP	120,60	4,49	9,01	37,5	0,15	0,09	2,31	0,63	0,45	0,09	9,49	0,47	0,17	0,29
2 Início	3	General	GeoChem General FP	120,60	2,75	9,13	37,4	0,17	0,1	2,32	0,67	0,46	0,1	9,58	0,48	0,19	0,34
3 Meio	1	General	GeoChem General FP	120,70	0,76	8,55	47,7	0,17	0,17	2,13	0,51	0,35	0,05	5,33	0,27	0,2	0,15
3 Meio	2	General	GeoChem General FP	120,70	2,96	8,42	48	0,15	0,17	2,12	0,51	0,35	0,06	5,37	0,28	0,2	0,14
3 Meio	3	General	GeoChem General FP	120,60	2,9	8,43	47,7	0,17	0,17	2,11	0,5	0,34	0,05	5,34	0,28	0,19	0,14
4 Verde	1	General	GeoChem General FP	120,80	3,52	7,62	42,7	0,17	0,1	2,03	0,67	0,3	0,04	5,1	0,25	0,21	0,15
4 Verde	2	General	GeoChem General FP	120,70	2,16	7,67	42,7	0,17	0,1	2,06	0,66	0,3	0,04	5,09	0,23	0,22	0,13
4 Verde	3	General	GeoChem General FP	120,70	1,66	7,46	43	0,14	0,1	2,04	0,67	0,3	0,04	5,1	0,23	0,22	0,11
4 Azul	1	General	GeoChem General FP	120,80	1,54	6,4	35,1	0,13	0,08	1,66	0,39	0,28	0,05	4,77	0,19	0,25	0,2
4 Azul	2	General	GeoChem General FP	120,80	4,42	6,58	34,9	0,12	0,08	1,64	0,39	0,27	0,05	4,78	0,2	0,24	0,19
4 Azul	3	General	GeoChem General FP	120,90	1,66	6,48	35,7	0,12	0,09	1,68	0,39	0,27	0,05	4,77	0,19	0,23	0,16

ANEXOS

ANEXO 1: Procedimento para pH em pasta (Sobek, 1978).

- 1) Pesar 10g de amostra (<60# ou <0,25mm) em um Becker;
- 2) Adicionar 5ml de água destilada no Becker com a amostra. **NOTA: NÃO MEXA!**

Permita que a água molhe a amostra por ação da capilaridade, sem agitação. Com a maioria dos materiais, a proporção 2:1 (sólido:água) fornece uma pasta satisfatória para medições de pH; No entanto, para materiais com textura muito grosseira ou muito fina, pode ser necessário adicionar mais água ou mais sólido para chegar próximo da saturação. Em condições próximas da saturação, a água não deve encharcar nem a superfície do sólido aparecer seca.

- 3) Mexa amostra com espátula até uma pasta fina ser formada adicionando mais água ou amostra, conforme necessário para manter o sólido no ponto de saturação. Nota: na saturação, a pasta brilha refletindo luz e a mistura desliza pela espátula facilmente. Lave a espátula com um jato de água destilada antes de mexer outra amostra.

- 4) Medir pH (calibrar pHmetro). Coloque eletrodo na pasta e mova com cuidado para garantir a remoção de película de água em torno do eletrodo. CUIDADO: Eletrodos são facilmente riscados. O contato entre pasta e eletrodo deve ser suave para evitar grandes impactos e possíveis danos.

ANEXO 2: Procedimento Net Acid Generation (NAG test).

- 1) Pesar aproximadamente 2,5g de amostra pulverizada em Becker de 500ml (em duplicata).
- 2) Adicione 250ml de solução 15% peróxido de hidrogênio (H₂O₂).

*Solução de H₂O₂: o pH da solução deve ser maior ou igual a 4,5. Se estiver menor adicionar solução de NaOH (1g / 100ml de água destilada) até 4,5<pH<6,0.

- 3) Registre a hora em que foi realizada a adição de H₂O₂.

4) Coloque vidros de relógio na boca do Becker e deixe-o em área ventilada ou em capela ligada.

5) Deixar a amostra reagir até cessar reação, ou por 24 horas.

*Se a amostra ferve ou reage vigorosamente, registrar o tempo aproximado que isso ocorrer. Se esta reação ocorrer durante a noite será indicado por condensação sob o vidro de relógio e pontos de oxidação da amostra. Registre como "reagiu durante a noite".

6) Depois da reação, colocar o Becker na chapa quente e deixe a amostra ferver suavemente durante 2 horas ou até a efervescência parar.

*Se reação começar quando a amostra for aquecida, anotar como "feita reagir por aquecimento".

7) Não permitir que a amostra seque. Adicione água deionizada para manter o volume aproximadamente constante.

8) Deixar a amostra esfriar a temperatura ambiente.

9) Lavar os sólidos que tenham possivelmente aderido nos laterais do frasco para dentro da solução utilizando água deionizada. Adicione água deionizada para se obter um volume final de 250 ml.

10) Registre o pH da solução. Esta medição do pH é referido como NAGph.