

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA**

Beatriz Carvalheira Moreira

**RESÍDUOS DA LAMA DE BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS:
POTENCIAL DE CONTAMINAÇÃO E POSSIBILIDADES DE USO**

Nº 223

Belo Horizonte

25/02/2021

Beatriz Carvalheira Moreira

**RESÍDUOS DA LAMA DE BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS:
POTENCIAL DE CONTAMINAÇÃO E POSSIBILIDADES DE USO**

Versão Final

Dissertação apresentada ao programa de Pós Graduação do Departamento de Geologia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Geologia.

Área de concentração: Geologia econômica e aplicada

Orientador: Prof. Dr. Adolf Heinrich Horn

Coorientadora: Profa. Dra. Mirna Aparecida Neves

Belo Horizonte

2021

M838r
2021

Moreira, Beatriz Carvalheira.

Resíduos da lama de beneficiamento de rochas ornamentais
[manuscrito] : potencial de contaminação e possibilidades de uso
/ Beatriz Carvalheira Moreira. – 2021.

46 f., enc. il. (principalmente color.)

Orientador: Adolf Heinrich Horn.

Coorientadora: Mirna Aparecida Neves.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais,
Instituto de Geociências, 2021.

Área de concentração: Geologia Econômica e Aplicada.

Bibliografia: f. 41-46.

1. Resíduos sólidos – Teses. 2. Rochas ornamentais –
Contaminação – Teses. 3. Solos – Poluição – Teses. I. Horn,
Adolf Heinrich. II. Neves, Mirna Aparecida. III. Universidade
Federal de Minas Gerais. Instituto de Geociências. IV. Título.

CDU: 628.49



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA



FOLHA DE APROVAÇÃO

**RESÍDUOS DA LAMA DE BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS:
INFLUÊNCIA NO SOLO E POSSIBILIDADES DE USO**

BEATRIZ CARVALHEIRA MOREIRA

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOLOGIA, como requisito para obtenção do grau de Mestre em GEOLOGIA, área de concentração GEOLOGIA ECONÔMICA E APLICADA.

Aprovada em 25 de fevereiro de 2021, pela banca constituída pelos membros:

Prof. Adolf Heinrich Horn - Orientador
UFMG

Prof. Paulo Roberto Antunes Aranha
UFMG

Prof. Flávio de Moraes Vasconcelos
Hidrogeo Engenharia e Gestão de Projetos LTDA

Belo Horizonte, 25 de fevereiro de 2021.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por ter aberto as portas para que esse Mestrado acontecesse, pelo teu amor e cuidado comigo durante esses 2 anos. Agradeço à minha Mãezinha, minha intercessora, Nossa Senhora Aparecida e Nossa Senhora Desatadora de Nós, que me acompanhou e fez com que todas as etapas do mestrado acontecessem da melhor maneira.

À minha família, em especial minha mãe Simone e minha irmã Luiza, que não mediram esforços para me apoiar, acalmar quando necessário, por todo amor e confiança depositados em mim. Aos meus amigos, Monik, Nathália, Lorena, Thais, Luana, Elton, Mariana e ao meu namorado Paulo Igor, que me acompanharam nessa jornada, eu nunca vou cansar de dizer muito obrigada. Eu amo todos vocês e sem vocês eu não teria chegado até aqui.

Agradeço a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), a Pró-reitoria de Pós-graduação (PRPg) da UFMG e ao Programa de Pós Graduação em Geologia do Instituto Geociências (IGC) pela oportunidade de fazer o mestrado e aos professores e técnicos do programa que me auxiliaram em campo e em análises que foram necessárias.

Agradeço também ao Centro de Pesquisas Professor Manoel Teixeira da Costa (CPMTC), em especial ao laboratório Pesquisas Ambientais – NGqA do Instituto Geociências da UFMG pelo uso do equipamento ICP-OES, ao laboratório de Geologia Aplicada da Universidade Federal do Espírito Santo – Campus Alegre por ter sido um ponto de apoio extremamente importante para preparação de amostras e análises físico-químicas e ao laboratório de sedimentologia do departamento de Oceanografia da Universidade Federal do Espírito Santos (UFES) – Campus de Vitória.

Ao meu orientador, Adolf Heinrich Horn, agradeço por todo suporte e confiança durante todas as atividades desenvolvidas no mestrado. E a minha coorientadora, Mirna Aparecida Neves, agradeço por todo acompanhamento diário no laboratório e nas atividades de campo, por todas orientações e incentivo desde a graduação.

Agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação no Espírito Santo (FAPES – processo 84322853) pelo financiamento do projeto de pesquisa ao qual esse trabalho está vinculado. E também aos gestores dos depósitos de resíduos que permitiram a coleta de amostras, a ADAMAG, a J.A. Transportes e ao Sr. Paulo.

RESUMO

A produção de rochas ornamentais no Brasil é uma importante atividade minerária, especialmente no Estado do Espírito Santo, responsável por grande parte da exportação dos mármore e granitos brasileiros. O processo de beneficiamento dos blocos rochosos, gera grande quantidade de resíduos formados pela Lama de Beneficiamento de Rochas Ornamentais (LBRO), além dos fragmentos de blocos. O objetivo desse trabalho foi avaliar o potencial de contaminação dos resíduos de LBRO diretamente sobre o solo através das suas características físico-químicas depositados em Cachoeiro de Itapemirim (ES) e sugerir aplicações no setor de construção civil. Foram utilizados métodos de geoprocessamento e visitas em campo para selecionar os depósitos identificados em imagens aéreas. A composição química das amostras coletadas em furos de sondagem foi determinada por fluorescência de raios X e espectrômetro de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES). Os dados obtidos foram utilizados para determinar os elementos traços, comparar com os valores estabelecidos pela normativa ambiental, analisar a influência dos elementos químicos no solo e foram comparados com dados de trabalhos publicados, que estudaram aplicabilidade desses resíduos na produção de cerâmica vermelha, concreto, cimento e argamassa, tijolos e vidrados. Como resultado, os resíduos apresentam granulometria muito fina, pH não corrosivo e umidade menor que 30% quando é tratado corretamente. Tanto os resíduos como os substratos foram classificados como não perigosos inertes e não inertes com baixo potencial de contaminação. A composição físico-química dos resíduos é compatível com a dos materiais já testados, indicando a viabilidade do seu uso como matéria-prima no setor da construção civil. Porém, a separação de resíduos provenientes dos principais grupos litológicos (mármore e granitos), e de teares multifios e convencionais, permitirá maior controle de qualidade e aplicações mais nobres.

Palavras-chave: Lama Abrasiva; Uso de Resíduos; Gestão de Resíduos Sólidos; Influência no Solo; Potencial de Contaminação.

Abstract

The production of dimension stones in Brazil is relevant mining activity, especially in the of Espírito Santo State, which exports the major part of the Brazilian dimension stones. Rock blocks processing generates enormous quantity of waste through the discarding of the Dimension Stone Processing Slurry (DPS), besides block fragments. The objective of this work was to evaluate the potential for contamination of LBRO waste directly on the soil through its physical-chemical characteristics deposited in Cachoeiro de Itapemirim (ES) and to suggest applications in the civil construction sector. Geoprocessing methods, together with field survey investigation, were used to select the representative deposits identified in aerial images. The chemical composition of the samples collected in drilling holes was provided by X-ray fluorescence (XRF) and an optical emission spectrometer with inductively coupled plasma (ICP-OES). The data obtained were used to determine the trace elements, compare with the values established by environmental regulations, analyze the influence of chemical elements on the soil was compared with data from previous works that tested the applicability of these wastes to produce red ceramic, concrete, cement and mortar, bricks, and glassy. As a result, the waste has very fine granulometry, non-corrosive pH and humidity below 30% when it is treated correctly. Both waste and substrates were classified as non-hazardous, inert and non-inert with low potential for contamination. The chemical composition of the deposited wastes is compatible with the tested materials, indicating the technical viability of their usage as raw material for the building sector. Nevertheless, the segregation of wastes providing from the two main lithological types (marble and granitic rocks), and of conventional and diamond wire looms, will allow better quality control and most noble applications.

Keywords: Abrasive Slurry; Use of Waste; Waste Management; Influence on Soil; Contamination Potential.

Lista de Ilustrações

Figura 1 - Localização dos depósitos no município de Cachoeiro de Itapemirim/ES. Fonte: IBGE, 2016.....	10
Figura 2 - Relação entre a mobilidade de íons em função do pH do solo. Fonte: Adaptado de Kabata-Pendias (2011).....	15
Figura 3 - Em "a", é evidenciado a especiação do alumínio em função do pH e em "b", a solubilidade da espécie $\text{Al}(\text{OH})_3$ em equilíbrio das espécies solúveis Al^{3+} e $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ em função do pH em que $\text{pC} = -\log[\text{Al}^{3+}]$. Fonte: (a) Adaptado de Freda (1991) e (b) Ladeira et al., (2014).....	18
Figura 4 - Demarcação dos depósitos estudados. Os depósitos 1 e 2 são aterros licenciados e os depósitos 3 e 4 são clandestinos e abandonados (Área: área aproximada, em m^2 , no ano 2021). Fonte: Google Earth Pro.....	21
Figura 5 – Mapa de Localização com os pontos de perfuração e linha de eletrorresistividade.....	21
Figura 6 - (a) Coleta de amostras em um dos depósitos estudados, por meio de (b) trado mecanizado e (c) detalhe do amostrador com o resíduo de LBRO, coletado em profundidade.....	22
Figura 7 - Esquema ilustrativo do processo da determinação de pH. A esquerda, pH-1, leitura ao misturar resíduo e a água e a direita, pH-2, leitura na solução, 30 minutos.....	24
Figura 8 - Faixa granulométrica dos resíduos estudados.....	26
Figura 9 - Faixa granulométrica dos substratos coletados abaixo dos aterros licenciados e depósitos clandestinos e dos solos testemunhos.....	29
Figura 10 - Teores de umidade dos resíduos, substratos e solos testemunhos.....	30
Figura 11 - pH dos resíduos, substratos e solos testemunhos de acordo com a ABNT (2004).....	31
Figura 12 – Condutividade elétrica dos resíduos, substratos e solos testemunhos.....	31
Figura 13 - Perfis de eletrorresistividade de quatro depósitos selecionados, usados para estimativa da profundidade e inferência da profundidade do solo (linha preta tracejada).....	32
Figura 14 - Comparação da composição química principal dos resíduos investigados em comparação com a composição de resíduos já testados em aplicações.....	39

Listas de Tabelas

Tabela 1 - Composição química dos resíduos finos da lama de beneficiamento de rochas ornamentais (LBRO) (valores em %)......	27
Tabela 2 – Composição química dos substratos coletados abaixo dos depósitos (%)......	29
Tabela 3 – Composição química dos solos testemunhos (%)......	29
Tabela 4 – Elementos liberados pelo extrato solubilizado (valores em ppm). Em negrito, evidenciam-se as amostras classificadas como não inerte e as de coloração alaranjada são as amostras de substrato.....	34

Sumário

1. Introdução	8
1.1 Objetivos	9
1.2 Localização dos depósitos	10
2. REVISÃO DE LITERATURA	10
2.1.1 Geração dos resíduos de beneficiamento de rochas ornamentais	10
2.1.2 Composição e Classificação dos resíduos finos de rochas ornamentais	12
2.1.3 Possíveis interações entre os resíduos e o meio ambiente e a mobilidade dos elementos e substâncias presentes nos resíduos finos de rocha ornamental	14
3. MATERIAIS E MÉTODOS	20
3.1 Seleção de Depósitos para Coleta de Amostras	20
3.2 Análise Física e Química dos Resíduos	22
3.3 Levantamento Geofísico	25
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
4.1 Caracterização Físico-química dos Resíduos	26
4.1.1 Faixa Granulométrica	26
4.1.2 Composição Química	26
4.2 Características Físico-Químicas dos Substratos e Solos e a Influência Ambiental dos Resíduos	28
4.2.1 Faixa Granulométrica	28
4.2.2 Composição Química	29
4.2.3 Umidade e pH	30
4.2.4 Eletroresistividade	32
4.2.5 Liberação de Elementos por Solubilização	33
4.3 Possibilidades de Uso dos Resíduos no Setor de Construção Civil	35
5. Conclusões	40
6. Referências Bibliográficas	41

1. Introdução

Em 2019, a produção de rochas ornamentais no Brasil atingiu 9,2 milhões de toneladas, envolvendo granitos, quartzitos, mármore, ardósia e outros tipos de rocha (ABIROCHAS, 2020a). No primeiro trimestre de 2020, a produção foi 5,6% menor, quando comparada ao mesmo período de 2019, possivelmente pelos efeitos da pandemia da Covid-19. Ainda assim, as exportações alcançaram cerca de US\$ 200 milhões, onde o estado do Espírito Santo foi responsável por quase US\$ 164 milhões (ABIROCHAS, 2020b). Entretanto, em setembro de 2020, mesmo com a desaceleração econômica gerada pela pandemia da Covid-19, o faturamento do setor superou o mesmo mês dos dois anos anteriores (ABIROCHAS, 2020c)

A produção de resíduos pelo setor é relevante, tendo em vista as grandes quantidades geradas e a concentração em poucos polos industriais. Pesquisas indicam que cerca de 25% a 30% do bloco serrado é transformado em pó e agregado à LBRO (MATHIELO et al., 2019) que posteriormente é descartada. Em uma área produtiva da Espanha (O Porriño), González (2005) calcula que a produção de resíduos ultrapassa 300.000m³ por ano; enquanto em Portugal, Oliveira (2005) estima que 3,5 milhões de m³ estão estocados em um único depósito da região (Aterro do Moinho). No Brasil, Buzzi (2008) relata que são produzidas cerca de 5,48 m³ de resíduo para cada bloco de rocha beneficiado.

O processo de beneficiamento de rochas ornamentais envolve a serragem de blocos de rocha em chapas (ou placas) e o polimento das chapas. A serragem dos blocos de rocha (ou desdobramento) é feita por teares convencionais, onde se utiliza uma polpa composta geralmente por granalha, cal e água, denominada de Lama do Beneficiamento de Rochas Ornamentais (LBRO). A LBRO é distribuída por cima dos blocos por chuveiros e recircula no sistema enquanto possuir poder abrasivo. Posteriormente, é depositada em tanques de armazenamento temporários (BRAGA et al., 2010) e finalmente conduzida para aterros industriais. Durante o processo, o pó da rocha serrada fica agregado à LBRO e passa a compor o resíduo sólido que será posteriormente descartado. Existem também os teares de fios diamantados (ou multifios), que fazem uso somente da água para resfriar, lubrificar e limpar os fios. Nesse caso, o resíduo a ser descartado é composto apenas pelo pó da rocha. O polimento das chapas é feito por pastilhas abrasivas e água, após aplicação de resinas e outros produtos sobre as chapas, conferindo brilho e acabamento às mesmas. Nesse processo, é produzida a lama de politriz, que é direcionada aos tanques de decantação para separação das fases líquida

e sólida, sendo que a primeira recircula e a segunda é descartada junto com a LBRO da serragem (BRAGA et al., 2010).

No Espírito Santo, a gestão desses resíduos é regulamentada pela Instrução Normativa (IN) nº 011/16 do Instituto Estadual de Recursos Hídricos e Meio Ambiente do Espírito Santo - IEMA (ESPÍRITO SANTO, 2016). De acordo com essa normativa, a LBRO compõe um resíduo sólido Não Perigoso - Classe II, composto basicamente por pó de rocha com ou sem elementos abrasivos e demais insumos do processo de beneficiamento. Essa classificação segue os critérios da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, que divide os resíduos Não-Perigosos, em Classe II-A (Não-Inertes) e Classe II-B (Inertes), sendo classificados como inertes os resíduos que apresentarem concentrações maiores do que estabelecidos nos ensaios de solubilidade pela NBR 10005 (ABNT, 2004). Pesquisas científicas sobre o tema mostram que a classificação desses resíduos pode variar entre as duas sub-classes, com alguns trabalhos considerando-os Não-Inertes (e.g. Braga et al., 2010; Manhães & Holanda, 2008; Neves et al., 2012), enquanto outros os classificam como materiais inertes (e.g. Aguiar et al., 2016; Moreira et al., 2003). Essa variação traz consequências importantes para a gestão dos resíduos, pois interfere em decisões e gera insegurança quanto às possibilidades de uso e disposição no solo, por exemplo.

Há poucos estudos de avaliação de impactos dos depósitos das marmorarias e nunca foi estudado detalhadamente o comportamento dos materiais ao longo do tempo ou das condições do solo logo abaixo do aterro e em suas imediações. Portanto, este trabalho visa a descrição das características químicas e físicas dos resíduos depositados no solo buscando contribuir para a avaliação de possíveis impactos ambientais, bem como o reaproveitamento deste material no futuro.

1.1 Objetivos

O objetivo geral do trabalho é verificar possíveis alterações causadas pelos resíduos sólidos da LBRO no solo ou substrato natural que constitui a base de depósitos selecionados localizados no Município de Cachoeiro de Itapemirim (ES), principal polo produtor de rochas ornamentais do Espírito Santo e propor possíveis usos do resíduo para o setor da construção civil.

Para isso, foram traçados os seguintes objetivos específicos:

- Selecionar áreas alvos para a realização deste estudo;
- Realizar um plano de amostragem e caracterização de solo e resíduos sólidos de LBRO;

- Obter resultados físico-químicos para determinar o potencial de contaminação do resíduo de LBRO no meio ambiente;
- Analisar e comparar entre si os teores dos elementos químicos obtidos por solubilização;
- Comparar a composição química obtida por fluorescência de raios X com dados da literatura de usos dos resíduos como matéria-prima para construção civil.

1.2 Localização dos depósitos

As áreas de disposição de resíduos de rochas ornamentais estudadas estão situadas no município de Cachoeiro de Itapemirim/ES. O mapa de localização foi feito no sistema de projeção Sirgas 2000 e os pontos vermelhos indicam a localização dos depósitos estudados (Figura 1).

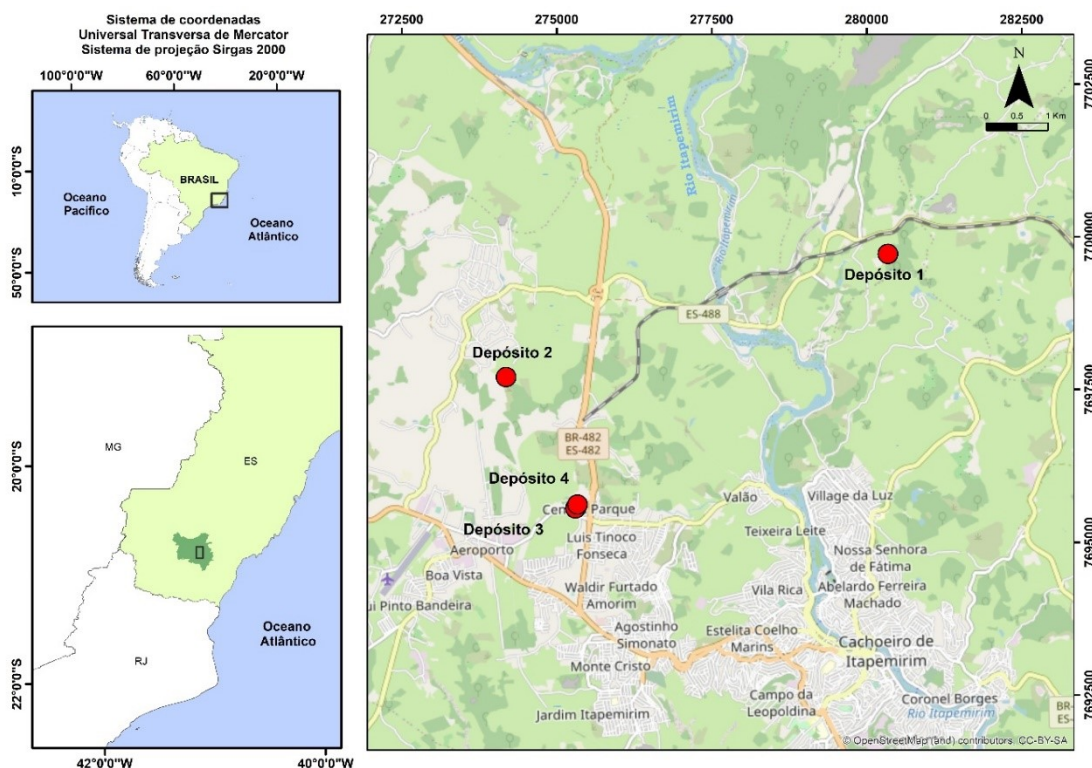


Figura 1 - Localização dos depósitos no município de Cachoeiro de Itapemirim/ES. Fonte: IBGE, 2016.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Geração dos resíduos de beneficiamento de rochas ornamentais

A Instrução Normativa nº 011/16 do Instituto Estadual de Recursos Hídricos e Meio Ambiente do Espírito Santo - IEMA (ESPÍRITO SANTO, 2016) define lama do beneficiamento de rochas ornamentais (LBRO) como resíduo sólido não perigoso, resultante dos processos de beneficiamento de rochas ornamentais. Neste trabalho, denominamos como LBRO a lama que circula dentro da empresa e; como resíduos sólidos, o material fino seco que é transportado para os aterros ou depósitos clandestinos.

Essa instrução estabelece que os resíduos nos aterros devem ter teor de umidade igual ou inferior a 30%. Os aterros devem ser instalados em locais onde o impacto ambiental seja minimizado, recomendando distância superior de 300 metros de núcleos populacionais. Também é determinado que estes aterros sejam construídos em áreas que não estejam sujeitas à inundação em um período de 100 anos; que possua no mínimo 3 metros de distância entre a base do aterro e o lençol freático; além de estar localizado, preferencialmente, a uma distância mínima de 200 metros de qualquer coleção hídrica, sendo que no caso de nascentes, nunca estar inferior a 100 metros (ESPÍRITO SANTO, 2006).

O processo produtivo de rochas ornamentais possui duas fases: pesquisa/extração e beneficiamento. O beneficiamento é subdividido na etapa de desdobramento que envolve serragem de blocos de rocha em teares usando uma serra convencional ou em teares usando fios diamantados (ou multifios) e no processo de acabamento das superfícies das placas ou chapas em que ocorre levigamento, polimento e lustro (CALMON & SILVA, 2006).

Na fase de desdobramento para o bloco ser serrado em tear usando fios diamantados é necessário somente a água para a limpeza, lubrificação e resfriamento das lâminas (CALMON & SILVA, 2006). Já em tear usando o processo convencional é necessário granalha, cal, cimento, argila e água que constituem a LBRO. Esta lama recircula no sistema e é distribuída por cima dos blocos por chuveiros dos teares e posteriormente é direcionada para o poço de bombeamento que expurga a LBRO para tanques de armazenamento temporário escavados no solo (BRAGA et al., 2010).

A chapa bruta gerada na serragem é transportada para o polimento. Neste processo a chapa bruta é transformada em chapa polida usando pastilhas abrasivas e água que recircula no sistema (BRAGA et al., 2010). A LBRO gerada é direcionada para tanques de decantação, onde são adicionados floculantes para propiciar a precipitação da fase sólida no fundo do tanque (MATHIELO et al., 2019) e posteriormente, é depositada no leito de secagem ou filtro-prensa juntamente com a LBRO gerada na fase de desdobramento (NEVES *et al.*, 2013).

Esses leitos de secagem são muitas vezes construídos de maneira inadequada (CALMON & SILVA, 2006), diretamente sobre o solo, sem impermeabilização lateral e de

fundo (BRAGA et al., 2010). O resíduo seco é transportado para aterros licenciados ou depósitos clandestinos (AGUIAR et al., 2016).

Em todas as etapas, independentemente do método utilizado, são produzidos resíduos, porém, o resíduo gerado pelo tear de fios diamantados possui menor potencial de impacto ao meio ambiente quando comparado ao tear convencional, pois nele não é utilizada a polpa de cal, granalha (fragmentos de metal fundido) e água. Contudo, no Brasil este tear ainda não é o mais utilizado devido ao custo e manutenção que ainda é muito alto (CALMON & SILVA, 2006).

No processo de acabamento, são utilizados insumos para proporcionar polimento e brilho às placas, alterar a textura das rochas, criar camadas protetoras, fechar os poros, impermeabilizar e intensificar a cor das superfícies. Estes insumos são lixas, escovas e fresas diamantadas, serras copo, rebolos abrasivos, ceras revitalizadoras, pastas abrasivas, intensificadores de cor, impermeabilizantes, diversos tipos de colas e grande quantidade de água (JUNIOR et al., 2019). De acordo com Aguiar et al. (2016) esses insumos são a base de magnésio, pasta ou pó de diamante ou resinas fenólicas.

No Brasil, são gerados cerca de 1,5 milhões de toneladas/ano de resíduos finos produzidos por beneficiamento de rochas ornamentais e aproximadamente 1 milhão de toneladas/ano de resíduos grossos (casqueiros e aparas), de acordo com Campos et al. (2014). Por exemplo, no beneficiamento secundário, em uma marmoraria, se a empresa produz 2 mil metros quadrados de chapa por mês, para fabricar ladrilhos de 2 cm de espessura e 5 mm de largura, são geradas aproximadamente 30 toneladas de lama abrasiva por ano (MATHIELO et al., 2019).

2.2 Composição e Classificação dos resíduos finos de rochas ornamentais

A composição química dos resíduos sólidos foi analisada por alguns autores, entre eles, Neves et al. (2019); Oliveira et al. (2016) e Santos et al. (2013) e mesmo sendo coletados em sítios diferentes, os elementos principais foram os mesmos e em concentrações muito próximas.

Os resíduos coletados por Neves et al. (2019) em um depósito em Cachoeiro de Itapemirim/ES, foram analisados por fluorescência de raios X e apresentaram composição química principal de óxidos de sílica (SiO_2), de alumínio (Al_2O_3), de cálcio (CaO), de magnésio (MgO), de potássio (K_2O), de sódio (Na_2O) e de ferro (Fe_2O_3).

Oliveira et al. (2016) analisaram a LBRO proveniente de três rochas diferentes: sienito, granito e gnaíse. Essa lama foi coletada no poço de expurgo e não teve contato com a lama do polimento. Foram encontrados predominantemente SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , K_2O e CaO .

Em um estudo realizado por Santos et al. (2013), foram diferenciados quimicamente pelo método de espectroscopia de raios-X de energia dispersiva (EDX). Os resíduos de uma rocha ornamental sílico-aluminosa que foi serrada por tear convencional e por tear de fios diamantados e submetidos aos processos de levigamento e polimento. Os autores nomearam os resíduos serrados pelo tear convencional como resíduo granalha. Neste estudo, o resíduo gerado pelo tear de fios diamantados tem como principal elemento a sílica e é isento de óxido de ferro. Os resíduos de levigação (desengrossamento das chapas), polimento e granalha possuem principalmente em suas composições químicas óxidos fundentes ricos em $\text{K}_2\text{O} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO}$. Todos os resíduos apresentaram SiO_2 e Al_2O_3 proveniente do tipo de rocha serrada (SANTOS et al., 2013).

Quanto a classificação de resíduos sólidos, a Norma 10004/2004 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2004) classificam em dois grupos: classe I – perigosos, caso apresentem risco à saúde pública, ocasione mortes, incidência de doenças e apresentar riscos ao meio ambiente, quando o resíduo for gerenciado de forma inadequada, ser inflamável, corrosivo, reativo, tóxico e/ou patogênico e classe II – não perigosos, sendo que a classe II é subdividida em classe II A – não inertes e classe II B – inertes.

Os resíduos não perigosos e não inertes (classe II A) podem apresentar propriedades de biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água, enquanto os resíduos não perigosos e inertes (classe II B) quando entrarem em contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, os seus constituintes não serão solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, de acordo com a Norma 10004/2004 (ABNT, 2004).

Para caracterizar os resíduos como perigosos ou não perigosos, deve ser feito o procedimento de extrato lixiviado, normatizado pela NBR 10005/2004 (ABNT, 2004) e para diferenciá-los entre não perigosos inertes e não perigosos não inertes, deve ser seguido a normativa NBR 10006/2004 (ABNT/2004). Neste sentido, os resíduos são classificados em sua totalidade como não perigosos.

No que se diz respeito aos resíduos de rochas ornamentais, alguns autores os classificam como classe II A – não inertes (BRAGA et al., 2010; MANHÃES e HOLANDA, 2008; NEVES et al., 2012), enquanto Aguiar et al. (2016), Moreira et al. (2003) os classificam como classe II B – inertes. Isto ocorre devido a variação das concentrações dos elementos presentes nos

resíduos, que por vezes apresentam valores maiores do que o limite máximo permitido no ensaio de extrato solubilizado na NBR 10004/2004 (ABNT, 2004).

2.3 Possíveis interações entre os resíduos e o meio ambiente e a mobilidade dos elementos e substâncias presentes nos resíduos finos de rocha ornamental

É relevante compreender as possíveis interações entre os resíduos finos gerados pelo beneficiamento de rochas ornamentais e o meio ambiente, em relação a alguns parâmetros. Por exemplo, qual a influência do pH, Eh, condutividade hidráulica e condutividade elétrica na disponibilidade dos elementos, mobilidade e solubilidade dos íons, complexos e elementos.

- pH e sua influência na disponibilidade, mobilidade e solubilidade dos elementos

O potencial hidrogênico (pH) controla grande parte das reações entre atmosfera, água, solo e sedimento, como: equilíbrio ácido-base, adsorção, solubilidade e dissolução de minerais, através de solubilização, adsorção e precipitação (VASCONCELOS et al., 2009).

O pH dos resíduos finos de rochas ornamentais é controlado pela cal utilizada durante o processo de serragem em tear convencional, atribuindo ao resíduo um pH alto, quando ocorre a dissolução da cal hidratada (NEVES et al., 2013). O pH apresenta ampla variação, a depender do local de coleta e do tipo de bloco serrado. Por exemplo, Freitas et al. (2012) coletaram os resíduos no poço de expurgo de uma empresa e encontraram altos valores de pH, entre 12 e 13, o que confere ao resíduo a classificação como resíduo perigoso, conforme a NBR 10004 (ABNT, 2004). Por outro lado, Neves et al. (2019) coletaram o material em um depósito e observaram valores de pH fora da faixa de periculosidade pois os valores tendem a se estabilizar com o tempo.

Neste sentido, é relevante observar os valores de pH, pois eles podem ser responsáveis pela liberação ou imobilização de substâncias para o meio ambiente (NEVES et al., 2019). De acordo com Kabata-Pendias (2011), a dissociação de íons ocorre em valores mais baixos de pH e em um potencial redox menor, ou seja, com o aumento do pH, a solubilidade dos cátions tendem a diminuir, como por exemplo os íons de Fe^{3+} , Al^{3+} , Mn^{2+} , Pb^{2+} , Cu^{2+} , Cr^{3+} , Zn^{2+} , Cd^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+} , Hg^{2+} (Figura 2).

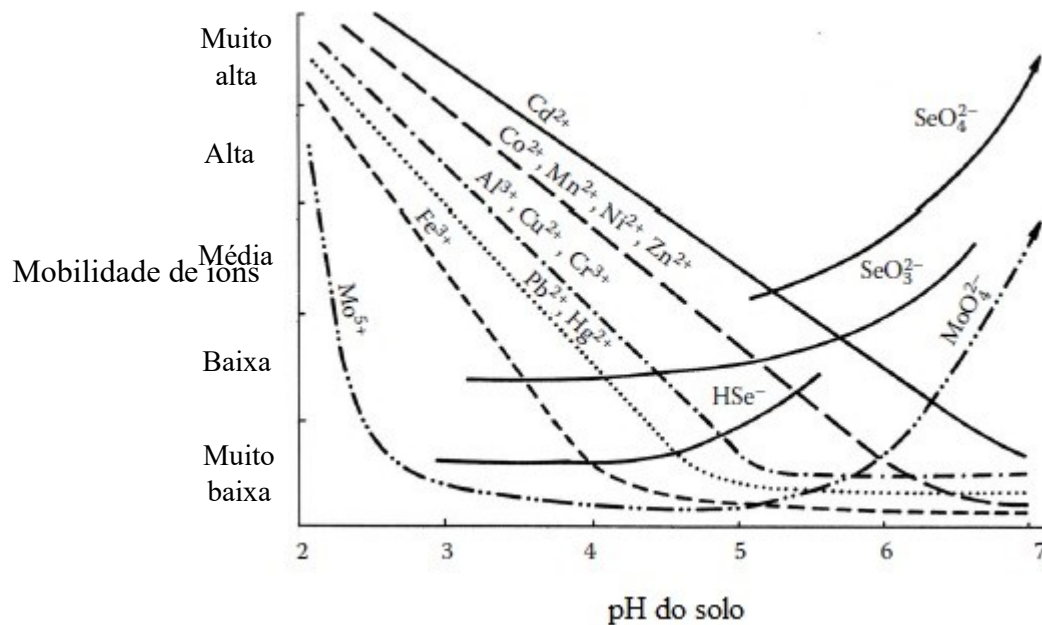


Figura 2 - Relação entre a mobilidade de íons e o pH do solo. Fonte: Adaptado de Kabata-Pendias (2011).

- Influência do resíduo na condutividade hidráulica do solo

A condutividade hidráulica está relacionada com a facilidade de percolação da água e é uma propriedade importante para o uso agrícola e para preservação do solo e do meio ambiente (GONÇALVES & LIBARDI, 2013). Temas como a lixiviação de substâncias químicas, elaboração de projetos de irrigação e drenagem e uso de fertilizantes estão correlacionados ao processo de infiltração e transmissão da água no solo (MESQUITA & MORAIS, 2004).

A granulação desses resíduos é muito fina, sendo isto favorável para o uso agrícola e para a velocidade de solubilização de elementos. Este pó usado em excesso, reduz a porosidade e assim torna-se preocupante devido à possibilidade de diminuir a velocidade de penetração e transmissão de água no solo (BERTOSSO et al., 2011).

Este efeito foi analisado por Bertossi et al. (2011) que testaram a aplicação de 20% de resíduo de beneficiamento de mármore no solo e testaram também os efeitos em uma superdosagem de 40%. Foi constatado que a condutividade hidráulica não apresentou diferença significativa nos diferentes teores de resíduos que foram aplicados, indicando que o resíduo não influenciou no fluxo da água em um solo saturado.

A água que passou tanto no solo puro como no solo misturado com o resíduo não apresentou diferença significativa em relação à turbidez e teores de potássio, sódio, ferro, cobre, zinco e manganês, enquanto a condutividade elétrica (CE), pH e concentrações de cálcio e magnésio aumentaram. Importante ressaltar que a CE da água aumentou somente no tratamento

em que foi utilizada a superdosagem (0,4%) de resíduo, enquanto o pH aumentou nas duas dosagens, de cerca de 5,4 para 7,0, porém apresentou valores dentro da normalidade para águas subterrâneas. Os valores de Ca e Mg triplicaram no uso de dosagem com 0,4% de resíduo, indicando que estes elementos são lixiviados (BERTOSSO et al., 2011).

- Influência do resíduo na condutividade elétrica do solo

A salinidade reflete a presença de solutos inorgânicos dissolvidos na fase aquosa como Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , HCO_3^- , NO_3^- , SO_4^{2-} e CO_3^{2-} . Um solo com alta salinidade pode causar toxicidade ou perturbar o equilíbrio nutricional das plantas, além de influenciar no complexo de troca de partículas do solo e conseqüentemente na permeabilidade (CORWIN et al., 2005).

A salinidade é estimada pela medida da condutividade elétrica (CE), que é a capacidade de um material em conduzir corrente elétrica (MOLIN et al., 2011). Sais solúveis, teor de argila e composição mineralógica, teor de água, matéria orgânica e temperatura do solo podem influenciar a condutividade elétrica medida em campo (CORWIN et al., 2005). Por este motivo, é imprescindível medir a condutividade elétrica do resíduo e do solo, para compreender como os íons presentes nos sítios estudados estão se comportando e influenciando na permeabilidade e mobilidade das substâncias.

A água é o principal meio condutor de corrente na medida de condutividade elétrica (MOLIN et al., 2011). O estudo realizado por Molin et al. (2011) sobre o comportamento da CE em perfis de solos com texturas distintas nos meses de abril, maio e agosto, meses estes que ocorreram variações com períodos mais úmidos e mais secos, resultou em analisar dados de CE em um perfil de solo com textura constante, porém com variação de tempo, notaram que a CE varia de acordo com o teor de umidade do solo. Já, ao analisar valores de CE em perfis de solos com texturas variáveis, mas em um mesmo período, a variação de CE ocorre de acordo com o conteúdo de argila, pois uma das propriedades da argila é a retenção de água e conduz mais eletricidade do que areia ou silte.

Quanto a influência do resíduo do LBRO, o experimento de Bertossi et al. (2011) que aplicou dosagens de 20% e 40% de resíduo no solo, indicou que a CE da água percolada neste material, aumentou nas duas dosagens e apresentou riscos de salinização do solo.

- Características físico-químicas de elementos presentes nos resíduos

O alumínio, ferro e manganês são alguns dos compostos nos resíduos que se encontram na lista de valores orientadores da NBR 100004 (ABNT, 2004). Se esses elementos apresentarem teores acima do permitido, de acordo com esta normativa, são classificados como não inertes.

É importante ressaltar que os elementos presentes nos resíduos podem interferir direta ou indiretamente na qualidade da água (BERTOSSO *et al.*, 2012) e do substrato conforme a sua mobilidade ou solubilidade.

Como literatura-base para caracterização físico-química dos elementos foi utilizado o trabalho de Kabata-Pendias (2011).

Alumínio (Al)

O Al é o terceiro elemento mais abundante na crosta terrestre, presente em feldspatos, micas e silicatos; sua solubilidade aumenta em solos ácidos ($\text{pH} < 5,5$) e hidróxidos de Al apresentam baixa solubilidade, especialmente em pH variando de 5 a 8; possui caráter anfótero, ou seja, reage com ácidos e álcalis fortes. Esse elemento apresenta toxicidade para espécies terrestres e aquáticas, em solos ácidos por exemplo, a alta disponibilidade de Al é uma condição limitante para o cultivo de plantas e o alumínio livre é considerado o mais tóxico para a biota. De acordo com Costa *et al.* (2010), com o aumento do pH do solo, o alumínio tóxico se transforma em alumínio insolúvel e não absorvido pelas plantas, pois a acidez potencial é reduzida.

Um estudo realizado por Freda (1991) sobre a toxicidade do Al em anfíbios ressaltou que em água com pH neutro, este elemento não atinge altas concentrações devido à sua baixa solubilidade nessas condições, já em corpos d'água acidificados sua solubilidade aumenta e ele pode ser extremamente letal.

O pH é um parâmetro determinante na especiação do alumínio e afeta a sua toxicidade (Freda, 1991). Na figura 3, é possível observar em (a) o efeito do pH da água na especiação de alumínio e em (b) o diagrama de solubilidade, onde se observa que o alumínio é solúvel em meio ácido produzindo Al^{3+} , assim como em ambiente alcalino, em que ocorre a formação de $\text{Al}(\text{OH})_4^-$.

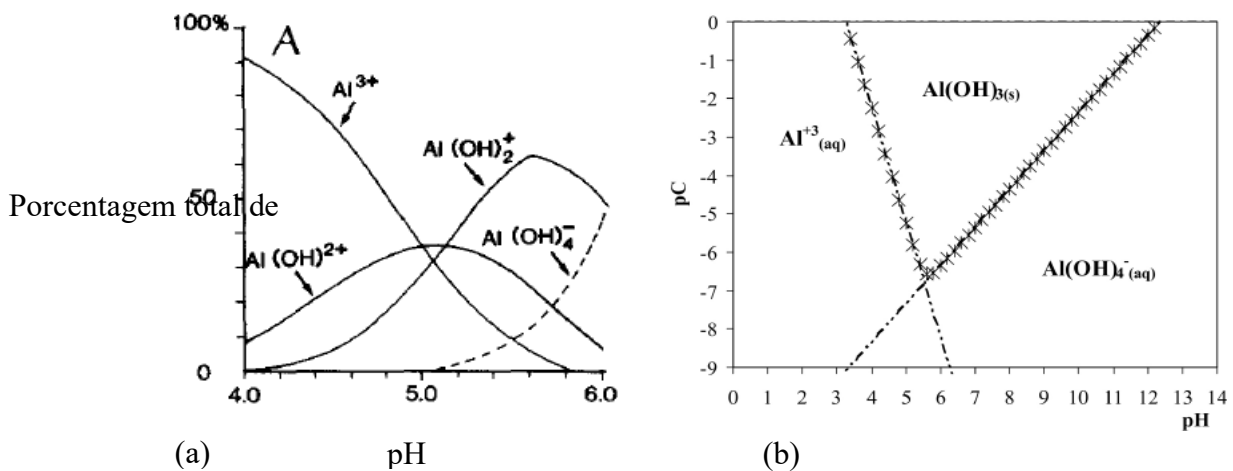


Figura 3 - a. Especificação do alumínio em função do pH; b. a solubilidade da espécie $Al(OH)_3$ em equilíbrio das espécies solúveis Al^{3+} e $Al(OH)_4^-$ em função do pH em que $pC = -\log[Al^{3+}]$. Fonte: (a) Adaptado de Freda (1991) e (b) Ladeira et al., (2014).

Ferro (Fe)

A média do conteúdo de ferro na crosta terrestre é de aproximadamente 5%, sendo este o metal mais importante da litosfera, com grande influência no comportamento de oligoelementos. Está presente entre macro e micronutrientes em plantas, animais e seres humanos, sendo que no solo, a sua abundância representa em média 3,5%, podendo aumentar em solos argilosos e alguns solos orgânicos.

O comportamento geoquímico do Fe é complexo, pois as condições físico-químicas afetam a sua oxidação. Pode ser considerado siderófilo, calcófilo ou litófilo; ocorre como íon férrico (Fe^{3+}), em condições com oxigênio, quando formado próximo a superfície e como íon ferroso (Fe^{2+}), quando formado em regiões mais profundas, em condições sem oxigênio. Dentre os principais minerais formados por este elemento destacam-se o óxido férrico (hematita) e óxido férrico hidratado (goethita).

A precipitação ou a mobilidade do ferro depende das condições ambientais, por exemplo, em ambientes alcalinos oxidantes o ferro tende a precipitar, enquanto em ambientes ácidos redutores, o ferro tende a ser mobilizado. O íon Fe pode precipitar como óxidos e hidróxidos, mas pode também substituir o Mg e o Al em outros minerais. De acordo com Ladeira *et al.* (2014), os minerais de ferro tendem a não sofrer dissolução em ambientes alcalinos pois quanto maior o pH, menor a solubilidade de Fe^{3+} .

Quando apresenta certa mobilidade, a depender do pH, Eh e temperatura, o Fe forma complexos que são os principais responsáveis pela migração e lixiviação do elemento entre os perfis e camadas do solo e esses complexos são relevantes para o fornecimento de Fe para as

raízes das plantas. Porém, quando estão em excesso causa toxidez às plantas e conseqüentemente a redução no crescimento e da produtividade (JUCOSKI *et al.*, 2016).

O Fe^{3+} , Fe^{2+} e óxidos hidratados amorfos controlam a mobilidade do ferro no solo, assim como fosfatos, sulfetos e carbonatos de ferro, também irão influenciar na solubilidade. A pirita (sulfeto de ferro) por exemplo, em pH alto é oxidada, porém em pH menor que 4,5 sofre interferência de microorganismos e nestes casos, pode ocorrer a liberação de metais e causar toxicidade para as plantas.

O Fe^{2+} pode se tornar tóxico em solos ácidos anaeróbicos, diferente do que ocorre em solos alcalinos bem arejados que tendem a ter baixas concentrações de Fe solúveis e conseqüentemente não ser tóxico para as plantas. Em solos encharcados anaeróbicos, a redução de Fe^{3+} para Fe^{2+} geralmente devido ao metabolismo das bactérias, causa o aumento da solubilidade do ferro.

Manganês (Mn)

Entre os oligoelementos, o Mn é um dos elementos mais abundantes na litosfera, normalmente seus teores mais altos são encontrados em rochas máficas e se comporta semelhante ao ferro em processos geoquímicos. Em condições atmosféricas normais, os minerais de Mn sofrem oxidação e os produtos são re-precipitados originando aglomerações de minerais secundários na forma de concreções e nódulos.

Processos intempéricos podem formar depósitos residuais com concentrações de óxidos/hidróxidos de Mn. Esta precipitação ocorre principalmente em clima tropical e subtropical. Em clima úmido e frio ocorre comumente lixiviação por soluções ácidas de sedimentos e solos.

Quando se encontra na forma do cátion Mn^{2+} , pode sofrer substituição isomórfica com Fe^{2+} e Mg^{2+} . O Mn está intensamente relacionado com as atividades microbianas em sedimentos e solos e ocorre principalmente em solos argilosos.

Este elemento é altamente móvel em pH ácido e quando se encontra na forma de óxido, em condições específicas do solo, influenciam também na mobilidade de alguns metais. A baixa solubilidade dos compostos de manganês ocorre em pH próximo à neutralidade, em sistemas oxidantes; sua solubilidade cresce à medida em que o valor de pH diminui em solos bem drenados; para o aumento da solubilidade em pH alcalino depende da capacidade do Mn em formar complexos aniônicos e complexos com ligantes orgânicos.

O Mn é de grande relevância pois auxilia na nutrição de plantas, influenciando o sistema de Eh e pH do solo e está sujeito a rápida oxidação e redução em ambientes diversos. Sob condições oxidantes há diminuição da disponibilidade de Mn e quando ocorre a redução, aumenta a sua disponibilidade a ponto de atingir a faixa tóxica.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização deste trabalho foram realizadas consultas ao Instituto Estadual do Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IEMA) para obter informações sobre os locais que possivelmente eram depósitos de resíduos da LBRO e foram utilizadas imagens aéreas para a localização dos depósitos, trado mecânico e sacos plásticos para coleta e amostragem de resíduos, substratos e solos e câmera fotográfica.

3.1 Seleção de Depósitos para Coleta de Amostras

O município de Cachoeiro de Itapemirim (ES) foi escolhido como área de estudo por ser a cidade capixaba que mais possui empresas de beneficiamento de rochas ornamentais. Após consultas ao Instituto Estadual do Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IEMA), para se obter informações sobre os possíveis sítios de deposição a serem estudados, foram realizadas visitas aos aterros para levantamento das condições e de permissão para o acesso, sendo esse um fator determinante para a seleção dos depósitos que foram amostrados.

Foram utilizadas imagens aéreas disponíveis gratuitamente na Internet e no Google Earth Pro que auxiliaram na localização, seleção e dimensionamento em área dos depósitos e dos pontos de perfuração onde foram feitas as coletas de resíduo. Os depósitos 1 com área de aproximadamente 44.653m² e 2 com cerca de 21.906m², que são aterros licenciados e os depósitos 3 em torno de 2.464m² e o 4 com 761m² aproximadamente, em situação irregular estão representados na Figura 4 pois nestes depósitos foram realizados furos que atingiram os substratos abaixo dos resíduos. O mapa de localização com os pontos de perfuração e linhas de eletrorresistividade estão representados na Figura 5.



Figura 4 - Demarcação dos depósitos estudados. Os depósitos 1 e 2 são aterros licenciados e os depósitos 3 e 4 são clandestinos e abandonados (Área: área aproximada, em m², no ano 2021). Fonte: Google Earth Pro, 2021.

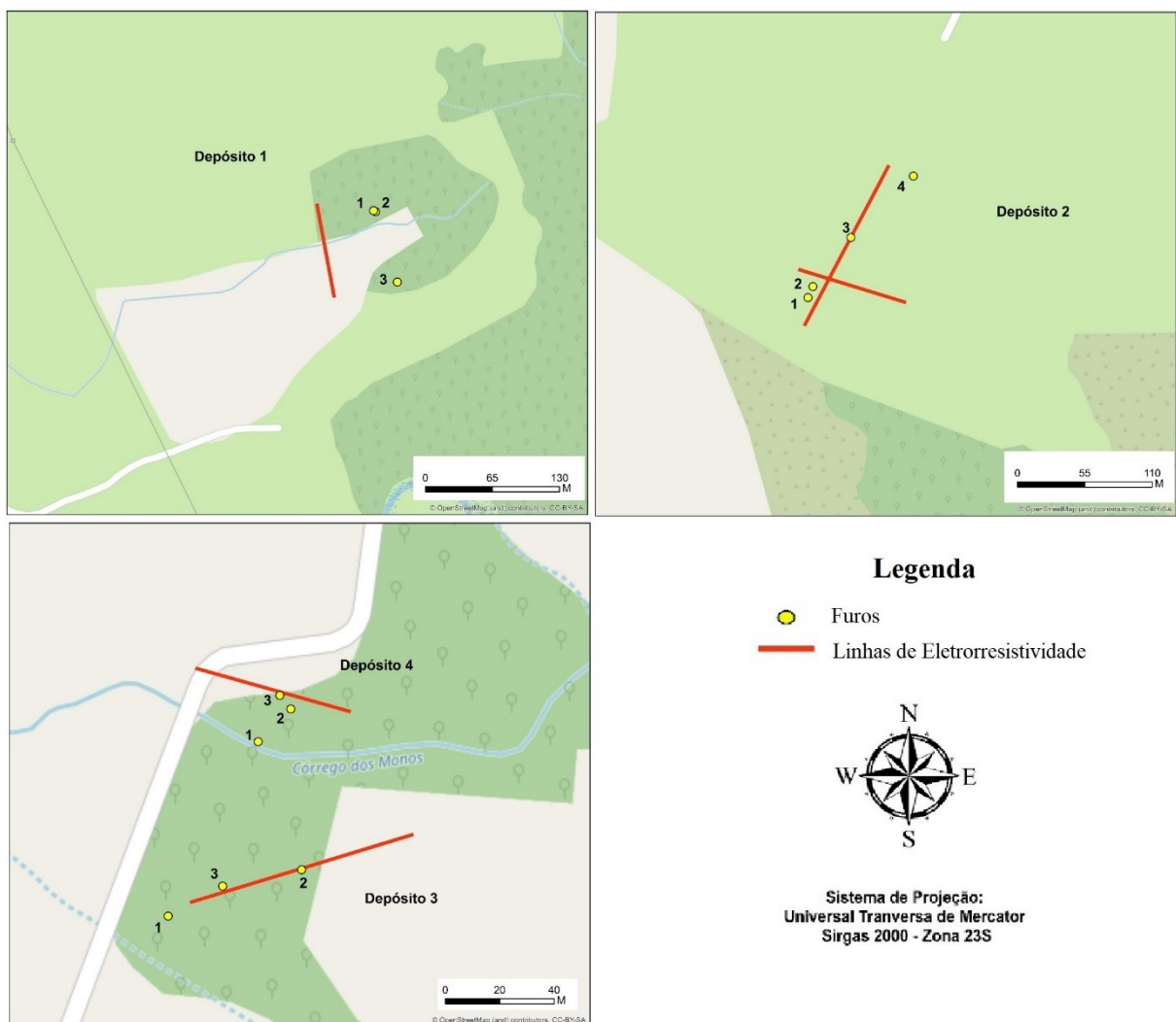


Figura 5 – Mapa de Localização com os pontos de perfuração e linha de eletroresistividade.

Foram coletadas amostras representativas dos resíduos, segundo a NBR 10007 (ABNT, 2004), em 8 depósitos. Os furos de sondagem dos depósitos 1, 2, 3 e 4 (Figura 6) foram realizados em paralelo e na linha do levantamento geofísico, nos pontos em que o trado

conseguisse perfurar, pois em muitos locais há presença de resíduos grossos de rochas. Foram utilizados trados mecânico e manual para perfurar e coletar amostras do resíduo e do substrato até a base do depósito e dos solos testemunhos que não tiveram contato com o resíduo (Figura 6). O intervalo de amostragem variou de 1 a 2 metros de profundidade, de acordo com a mudança de características físicas que os resíduos apresentavam pois assim foi obtido amostras representativas de cada depósito. Foram coletadas 70 amostras de resíduos, 6 amostras de substrato abaixo dos depósitos 1, 2, 3 e 4 e 2 amostras de solo testemunho. Todas as amostras (resíduos, substratos e solos) ficaram armazenadas refrigerador, sob cerca de 4° C para a preservação das amostras conforme a NBR 10007/2004 (ABNT, 2004), até o momento das análises.



Figura 6 - (a) Coleta de amostras em um dos depósitos estudados, por meio de (b) trado mecanizado e (c) detalhe do amostrador com o resíduo de LBRO, coletado em profundidade.

3.2 Análise Física e Química dos Resíduos

Para a análise granulométrica uma porção das amostras dos resíduos e dos solos foram homogeneizadas, quarteadas e secas em estufa com temperatura a 100°C. Posteriormente, 100g (base seca) de cada amostra, foram destorroadas e tamisadas em peneira de abertura 2,00mm e colocadas em garrafas plásticas com 200mL de água deionizada e agitadas durante 6 horas em um agitador rotativo para não voláteis (TE-743). Após esta etapa, as amostras foram passadas em peneira de abertura 0,053mm, separando as frações passante e retidas.

A fração retida foi seca na em estufa a 100°C. Porém, ao serem retiradas da estufa, 10 amostras (D1F1A2, D2F6A2, D2F6A3, D2F6A4, D2F6A5, D2F6A6, D2F7A1, D2F7A2, D2F7A3, D3F4A1) apresentaram grãos aglutinados e passaram novamente pelo agitador por 6 horas. Para cada 20g dessas amostras, foram utilizados 10mL de NaOH e 110mL de água

deionizada e os grãos se individualizaram. Em seguida, todas as amostras foram passadas em um agrupamento de peneiras de abertura: 0,250mm, 0,125mm, 0,090mm e 0,075mm. Este agrupamento foi determinado de acordo com o tamanho dos grãos observados.

A fração passante ficou em repouso durante cerca de 24 horas para a decantação, e posteriormente a solução sobrenadante foi retirada por sucção e o material fino foi seco em estufa a 100°C. Após a secagem, foram enviados para análise no sedígrafo (Hydro 2000MU) do laboratório de sedimentologia do departamento de Oceanografia da Universidade Federal do Espírito Santos (UFES) – Campus de Vitória.

Para as análises químicas, uma porção das amostras foram homogeneizadas, quarteadas e secas em estufa com temperatura controlada de 42 °C.

Para determinação do teor de umidade, as amostras foram pesadas periodicamente em balança de precisão até atingir massa constante e calculada através da Equação 1.

$$\text{Equação (1) - } U = \frac{(m + m_1) - m_2}{m} \times 100\%$$

Em que,

m é a massa tomada para o ensaio (g);

m_1 é a massa do recipiente (g);

m_2 é a massa do recipiente e amostra após a secagem (g).

Uma alíquota foi utilizada para determinar a composição química das amostras por espectrometria de fluorescência de raios-x (FRX). A preparação das amostras envolveu a trituração de 8 g de cada amostra em almofariz de ágata. Foram confeccionadas pastilhas fundidas e para cada 1g de amostra foram utilizados 9g de Tetraborato de Lítio e 1,5g de Carbonato de lítio. Somente para as duas amostras de solos testemunhos foram feitas pastilhas prensadas e foram utilizados 10g de amostra e 2g de amalgamante Maxxiwax MW1000 da empresa Oregon Labware. Os dados químicos são expressos em porcentagem em peso de óxidos: SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, MgO, K₂O, Na₂O, TiO₂, SO₃, P₂O₅, MnO, SrO, ZrO₂, CuO, Cr₂O₃, BaO, ZnO e Br. A perda ao fogo foi determinada pela perda de massa no processo de calcinação.

Os resultados foram comparados com 60 trabalhos da literatura, buscando verificar se os componentes se encaixam dentro da faixa composicional de resíduos já testados como matéria-prima para fabricação de cerâmica vermelha, concreto, cimento e argamassa, tijolos e vidrados. Para isso, foram compilados dados publicados em trabalhos científicos onde os autores testaram e comprovaram a adequabilidade da aplicação de resíduos da LBRO nesses

produtos. Foram considerados apenas trabalhos de revistas científicas disponíveis na base de dados.

Uma alíquota de cada amostra foi utilizada para determinação do potencial hidrogênico (pH). De acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004), um resíduo é considerado corrosivo se apresentar pH igual ou inferior a 2,0 ou igual ou superior a 12,5. A medição do pH deve ser realizada em solução aquosa, na proporção de 1:1. As medidas foram feitas em dois momentos, ao misturar o resíduo e a água e após 30 minutos, quando ocorre a decantação, sendo identificadas como pH-1 e pH-2, respectivamente (Figura 7).

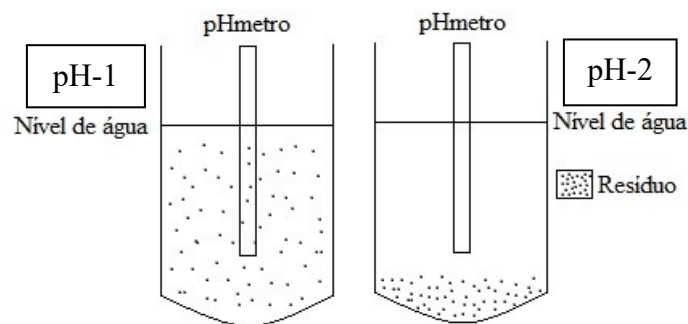


Figura 7 - Esquema ilustrativo do processo da determinação do pH. A esquerda, pH-1, leitura ao misturar resíduo e a água e a direita, pH-2, leitura na solução, 30 minutos.

O procedimento para a obtenção de extrato solubilizado, foi feito de acordo com a NBR 10006 (ABNT, 2004). Uma alíquota de 250 g desta base seca do resíduo ou solo foram tamisadas na peneira de abertura 9,5 mm e colocadas em frascos de 1500 mL. Em cada frasco foi adicionado 1000 mL de água destilada, agitando a amostra em baixa velocidade durante 5 minutos. O frasco foi devidamente coberto com filme de PVC e ficou em repouso por 7 dias em temperatura de no máximo 25°C. Após este período, a solução sobrenadante foi filtrada em aparelho com membrana filtrante com abertura de 0,45 µm. Essa solução é considerada como o extrato solubilizado, o qual foi conservado sob refrigeração após adição de ácido nítrico ultrapuro até atingir pH menor do que 2,0.

A medição da concentração de metais no extrato obtido por foi feita com um espectrômetro de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES) para determinação dos teores de Al, Fe, Mn, Ba, Cr, Cu, Zn, Cd, Pb, Ca, Mg, Ti, Ni e Co.

Uma alíquota da solução filtrada, foi utilizada para a medida da condutividade elétrica. Foi utilizado o equipamento multiparâmetro AK88. O equipamento foi calibrado com solução de 1413µS/cm.

Para as análises de granulometria, umidade, pH foram utilizadas 58 amostras de resíduos e para a análise de FRX foram utilizadas 70 amostras de resíduos. Tanto para as análises granulométricas, umidade, pH foram usadas 6 amostras de substratos abaixo dos depósitos e FRX foram usadas 4 amostras dos substratos abaixo dos depósitos e 2 amostras de solo testemunho coletadas na etapa de campo do mestrado. Para a análise do extrato solubilizado foram lidos pelo ICP-OES 46 amostras de resíduos e 4 amostras de substratos abaixo dos depósitos. Os dados do FRX apresentados integram amostras que foram coletadas neste trabalho e em outros trabalhos que compunham o banco de dados do projeto em que este mestrado está inserido sob forma de subprojeto. Os dados de granulometria, umidade, pH, extrato solubilizado foram obtidos durante a realização do mestrado e são referentes aos depósitos 1, 2, 3 e 4 (Figura 4).

3.3 Levantamento Geofísico

O levantamento geofísico pelo método de eletrorresistividade foi realizado com o equipamento ABEM SAS 1000, em perfis perpendiculares entre si, com eletrodos em arranjo dipolo-dipolo que é mais adequado e sensível para detectar estruturas verticalizadas como fraturas, falhas e descontinuidades e Wenner que é um arranjo mais robusto, com menor sensibilidade para captar estruturas, porém, é melhor para identificar camadas horizontalizadas. Os eletrodos, irrigados com uma mistura de água e sal, tiveram o espaçamento entre 1,0 e 1,5 m para fornecer mais detalhe, identificar melhor possíveis contatos e cobrir a área do aterro. Os dados foram processados no programa Res2Dinv, gerando os perfis com as diferenças de eletrorresistividade dos materiais. Este levantamento foi realizado concomitantemente com a amostragem para auxiliar na estimativa da profundidade e demarcação do limite entre o depósito de resíduo e o solo. Este levantamento foi feito nos depósitos 1, 2, 3 e 4 que foram feitas coletas do substrato (Figura 4).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados foram apresentados de acordo com as características físico-química dos resíduos, para posteriormente, ser feita a caracterização física e química dos substratos abaixo dos depósitos e solos testemunhos, relacionando-os com a possível influência ambiental dos resíduos. Foi apresentado também as possibilidades de uso dos resíduos no setor de construção

civil, comparando a composição química obtida por FRX dos resíduos dos depósitos com os dados de literatura.

4.1 Caracterização Físico-química dos Resíduos

4.1.2 Faixa Granulométrica

Os resíduos apresentam em sua maioria faixa granulométrica muito fina, variando de areia média com grãos de $\sim 0,250\text{mm}$ a argila muito fina com grãos atingindo a faixa de $<0,00024\text{mm}$. Aproximadamente 80% dos resíduos são menores do que $0,053\text{mm}$ (Figura 8).

Importante ressaltar que as curvas dos resíduos que apresentam granulometria um pouco maior na faixa de $0,1\text{mm}$ são amostras que estão em contato com o solo, seja na superfície ou com solo abaixo dos aterros licenciados e depósitos clandestinos.

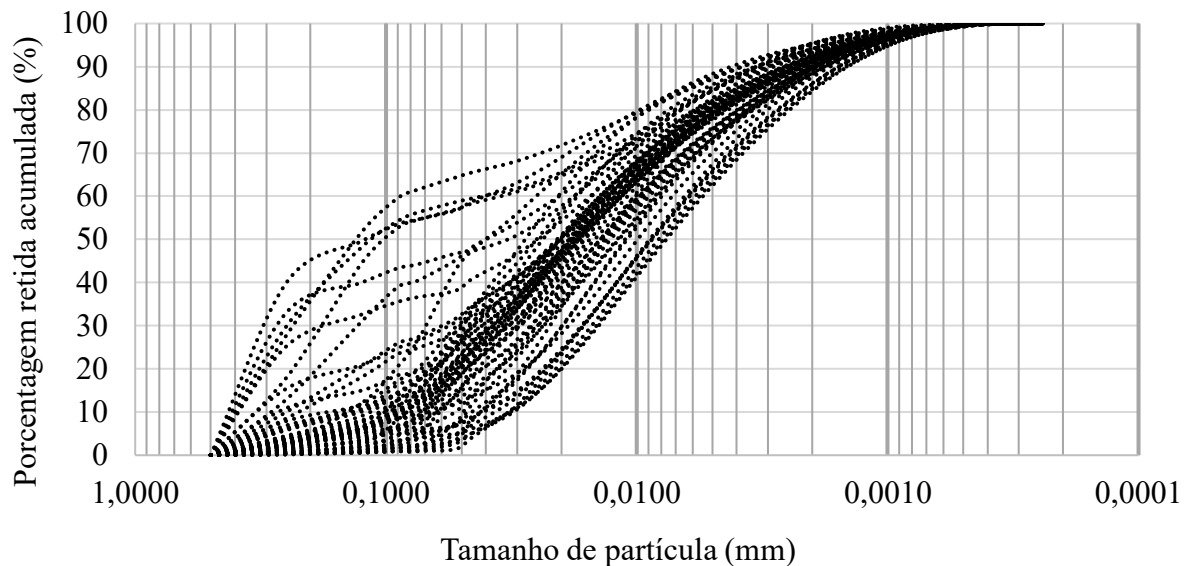


Figura 8 - Distribuição granulométrica dos resíduos estudados.

4.1.2 Composição Química

A composição química principal dos resíduos finos gerados pelo descarte da LBRO, depositados nos locais estudados, é apresentada na Tabela 1. O SiO_2 perfaz mais da metade da constituição química do material com teor médio de 53%. Após o SiO_2 , o Al_2O_3 seguido do CaO apresentam as maiores concentrações com aproximadamente 12% e 10% em média, respectivamente. Destaca-se que o CaO possui grande variabilidade, podendo atingir um teor de 79%. Observa-se também que entre a composição química principal, o Fe_2O_3 possui teor médio de 6%, seguido do MgO com 4,5%, K_2O com 3,45% e Na_2O com 2,64%. Estes componentes são comumente encontrados nas rochas silicáticas e carbonáticas que são serradas

durante o processo de beneficiamento. Porém, é importante ressaltar que os insumos utilizados como a cal fornece grande quantidade de cálcio, assim como o uso da granalha durante a serragem influencia diretamente na concentração de Fe_2O_3 . Elementos secundários e traços como BaO , ZrO_2 , SrO , ZnO , Rb_2O , CuO , Cr_2O_3 e Br estão inclusos em “outros elementos” por apresentarem concentrações bem baixas. A perda ao fogo varia de 0,00% a 23,72%, sendo que os valores mais altos se encontram em amostras de um mesmo depósito que armazena apenas resíduo de polimento de mármore.

Tabela 1 - Composição química dos resíduos finos da lama de beneficiamento de rochas ornamentais (LBRO) (valores em %)

Amostra	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	TiO_2	SO_3	P_2O_5	MnO	Outros	PF
1	48,06	12,29	5,91	16,82	6,39	4,69	2,48	0,71	0,15	0,24	0,08	0,56	1,60
2	53,93	13,20	4,91	13,83	4,88	4,93	2,62	0,55	0,12	0,22	0,07	0,34	0,40
3	54,09	13,05	5,28	13,38	4,96	5,02	2,53	0,59	0,14	0,23	0,06	0,35	0,30
4	53,01	14,31	6,07	8,21	8,91	4,03	2,18	1,23	0,36	0,44	0,10	0,42	0,54
5	36,86	10,07	10,04	21,38	13,60	3,39	1,89	0,86	0,20	0,34	0,13	0,65	0,39
6	45,78	11,88	6,98	15,39	11,63	3,15	1,85	1,53	0,31	0,55	0,10	0,37	0,36
7	66,77	13,43	6,35	3,99	1,01	5,13	2,64	0,23	0,07	0,13	0,07	0,12	0,06
8	63,08	14,08	7,76	4,15	2,05	4,46	2,27	1,13	0,10	0,56	0,09	0,15	0,04
9	61,07	14,56	8,93	3,94	1,38	5,25	2,77	0,96	0,12	0,49	0,10	0,34	0,04
10	59,44	14,58	7,07	5,02	3,60	5,36	2,85	0,71	0,10	0,34	0,09	0,43	0,21
11	65,88	13,18	8,93	2,57	1,08	5,09	2,20	0,56	0,00	0,19	0,11	0,15	0,03
12	59,84	14,86	8,78	4,90	2,37	4,17	2,31	1,37	0,13	0,78	0,11	0,29	0,05
13	61,03	13,42	9,11	5,44	1,11	5,09	2,99	0,69	0,14	0,33	0,11	0,37	0,07
14	60,56	14,10	7,11	5,55	2,75	4,83	2,83	0,89	0,12	0,44	0,10	0,40	0,15
15	59,27	13,95	7,75	7,11	2,24	4,71	3,05	0,85	0,12	0,33	0,10	0,41	0,23
16	54,81	13,19	14,02	6,04	2,17	4,55	2,86	0,94	0,09	0,46	0,15	0,44	0,17
17	60,35	14,01	7,33	6,05	1,61	4,81	3,01	0,97	0,13	0,50	0,09	0,43	0,49
18	62,11	14,53	6,56	5,31	1,52	4,97	2,97	0,75	0,13	0,37	0,08	0,33	0,29
19	31,61	6,78	2,36	42,20	12,15	2,12	1,11	0,43	0,09	0,13	0,06	0,24	0,70
20	9,90	1,92	0,90	71,84	13,29	0,51	0,18	0,11	0,09	0,05	0,04	0,03	1,14
21	23,01	5,46	2,20	52,25	13,34	1,39	0,69	0,33	0,08	0,08	0,06	0,22	0,85
22	9,41	1,45	0,66	79,16	7,46	0,38	0,16	0,11	0,11	0,00	0,02	0,03	1,03
23	53,67	11,10	3,76	13,42	10,35	4,07	1,90	0,57	0,11	0,20	0,07	0,27	0,33
24	34,20	7,01	2,92	39,82	10,39	2,46	1,19	0,47	0,12	0,11	0,26	0,21	0,87
25	54,53	14,77	13,19	5,69	1,75	3,64	3,76	1,32	0,51	0,47	0,14	0,14	0,00
26	53,83	13,49	9,61	5,96	1,87	3,86	2,79	0,84	0,00	0,33	0,10	4,66	2,68
27	61,26	15,01	7,48	3,52	1,39	4,15	4,47	0,75	1,04	0,34	0,06	0,30	0,21
28	62,32	15,05	6,01	3,50	1,72	3,82	4,13	1,05	0,61	0,43	0,05	0,09	1,23
29	58,07	14,01	10,52	5,18	1,69	3,95	3,15	0,96	0,37	0,51	0,11	0,12	1,37
30	61,06	13,36	7,98	4,80	1,87	4,16	3,20	0,98	0,51	0,49	0,08	0,26	1,26
31	65,59	17,83	2,72	1,22	0,38	2,67	1,39	0,33	0,43	0,15	0,00	0,16	7,04
32	53,55	13,42	9,96	5,72	2,41	3,77	3,26	0,91	0,56	0,38	0,10	0,42	5,50
33	62,45	13,31	9,30	4,13	1,22	3,86	2,93	0,71	0,54	0,36	0,08	0,27	0,81
34	59,87	13,15	7,14	5,04	2,09	3,97	3,23	0,70	0,53	0,30	0,06	0,09	3,77
35	69,89	15,76	1,89	1,00	0,00	3,56	1,07	0,00	0,00	0,00	0,06	0,60	6,18
36	51,66	12,18	5,97	8,31	4,07	2,97	2,51	0,64	0,00	0,36	0,05	1,13	10,15
37	46,31	9,97	8,55	10,42	3,45	3,51	2,22	0,54	0,00	0,34	0,09	4,02	10,57

38	43,90	10,31	8,50	11,75	2,72	3,33	2,53	0,63	0,00	0,35	0,07	4,17	11,75
39	58,02	14,41	6,88	4,85	1,53	3,43	2,17	0,54	0,00	0,32	0,06	1,01	6,77
40	47,55	11,26	4,90	11,48	5,96	2,71	3,35	0,80	0,52	0,39	0,06	0,05	10,98
41	61,72	15,29	5,30	5,46	2,68	3,53	3,84	1,01	0,58	0,42	0,06	0,11	0,00
42	59,85	14,56	8,52	5,22	2,30	3,26	3,44	1,19	0,63	0,64	0,09	0,32	0,00
43	50,69	14,03	11,18	6,12	3,13	2,59	3,35	1,40	0,55	0,69	0,10	0,09	6,09
44	56,85	13,88	10,73	5,82	2,25	3,32	3,63	1,56	0,48	0,69	0,10	0,09	0,59
45	65,26	12,39	6,01	3,96	1,79	3,23	3,39	0,74	0,60	0,34	0,06	0,07	2,15
46	66,55	12,48	3,26	4,08	2,09	3,07	3,71	0,50	0,65	0,31	0,06	0,05	3,19
47	61,07	12,84	6,14	4,83	2,69	3,03	3,26	0,97	0,57	0,50	0,09	0,08	3,91
48	50,67	8,00	5,55	8,39	9,20	1,93	2,22	0,48	0,61	0,23	0,08	0,12	12,43
49	61,37	13,79	7,65	4,50	2,01	3,57	3,27	1,27	0,71	0,46	0,08	0,11	1,14
50	54,86	13,48	10,36	6,48	2,74	3,46	3,28	1,68	0,61	0,81	0,12	0,13	1,99
51	56,80	13,54	10,02	6,03	2,59	3,06	3,19	1,45	0,50	0,61	0,11	0,13	1,91
52	68,52	8,85	2,19	1,95	2,13	2,73	3,20	0,21	0,22	0,23	0,00	0,06	9,70
53	55,83	13,87	10,66	6,25	2,45	3,49	3,49	1,30	0,58	0,39	0,13	0,41	1,15
54	63,04	13,45	7,86	4,20	1,47	3,97	3,14	0,56	0,45	0,40	0,10	0,12	1,14
55	57,92	14,40	10,61	4,94	2,07	3,42	3,44	1,21	0,51	0,56	0,12	0,10	0,69
56	64,27	11,58	7,97	4,49	1,93	3,47	3,05	1,06	0,46	0,37	0,08	0,08	1,20
57	67,99	11,47	6,33	3,42	1,23	3,90	3,16	0,60	0,44	0,00	0,08	0,11	1,27
58	59,45	13,47	5,07	4,91	2,64	4,11	3,61	0,72	0,55	0,33	0,06	0,09	4,97
59	61,63	12,98	3,77	5,07	2,14	4,53	2,98	0,42	0,49	0,28	0,05	0,05	5,61
60	59,25	12,94	4,63	5,74	2,15	4,77	3,43	0,49	0,41	0,26	0,06	0,11	5,58
61	58,49	13,73	5,96	4,76	2,10	2,95	2,72	0,73	0,50	0,29	0,00	0,10	7,59
62	66,73	14,62	3,73	2,18	0,76	0,67	2,26	0,91	0,54	0,00	0,04	0,09	7,31
63	38,70	9,60	2,86	15,48	11,51	2,69	2,42	0,41	0,43	0,00	0,06	0,07	15,54
64	37,70	8,27	2,08	12,14	12,77	2,03	1,88	0,28	0,39	0,17	0,06	0,07	21,92
65	47,09	11,07	2,88	7,76	9,97	2,63	2,22	0,45	0,38	0,00	0,07	0,08	15,08
66	35,30	7,31	2,26	14,73	11,99	1,85	1,94	0,36	0,31	0,17	0,00	0,07	23,72
67	33,75	8,75	2,26	14,05	12,45	2,19	1,62	0,47	0,46	0,00	0,06	0,08	23,71
68	52,99	0,00	4,63	5,41	4,60	2,06	2,21	0,71	0,49	0,00	0,06	0,07	11,97
69	38,21	8,89	2,50	11,83	11,87	2,13	2,05	0,37	0,36	0,00	0,06	0,07	2,38
70	39,24	8,86	3,16	12,19	10,77	2,20	1,88	0,39	0,43	0,00	0,05	0,07	20,36
Média	53,56	12,03	6,41	10,61	4,50	3,45	2,64	0,76	0,34	0,32	0,08	0,40	4,36
Mediana	57,97	13,26	6,34	5,71	2,39	3,50	2,81	0,71	0,39	0,34	0,08	0,14	1,25
Desv. Pad.	12,63	3,35	3,05	14,25	4,10	1,14	0,86	0,38	0,23	0,20	0,04	0,85	6,03
Min	9,41	0,00	0,66	1,00	0,00	0,38	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00
Max	69,89	17,83	14,02	79,16	13,60	5,36	4,47	1,68	1,04	0,81	0,26	4,66	23,72

* PF = perda ao fogo

4.2 Características Físico-Químicas dos Substratos e Solos e a Influência Ambiental dos Resíduos

4.2.1 Faixa Granulométrica

Os substratos e solos testemunhos apresentam 34% da sua granulometria grãos com 0,250mm e foram classificados como areia média, 37% representam areia fina com grãos variando entre 0,125mm e 0,090mm, 1% está na faixa de silte com 0,053mm e 26% são menores

do que do que 0,053mm. As curvas representadas pela cor azul indicam a granulometria dos solos testemunhos e as curvas de cor preta representam os substratos coletados na base dos depósitos (Figura 9).

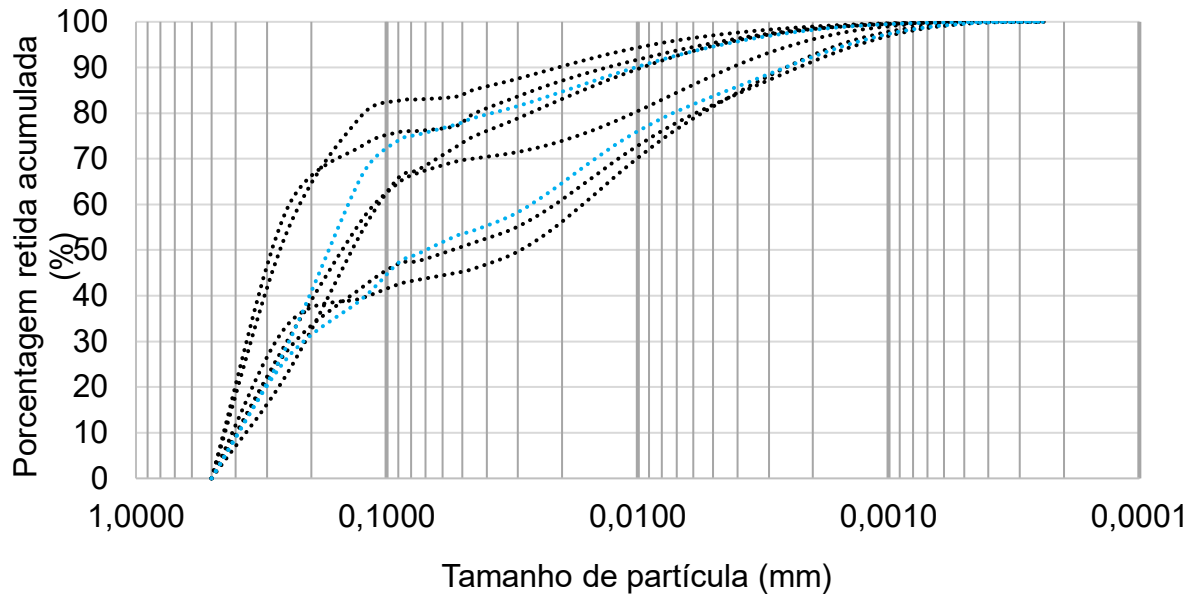


Figura 9 - Faixa granulométrica dos substratos coletados abaixo dos aterros licenciados e depósitos clandestinos e dos solos testemunhos.

4.2.2 Composição Química

A tabela 2 apresenta os constituintes principais dos substratos coletados abaixo dos depósitos e a tabela 3 a composição química dos solos testemunhos. Observa-se que Al_2O_3 apresenta maior concentração nos solos testemunhos, o que é um fator relevante pois demonstra que a região já apresenta solos aluminosos independente da presença dos resíduos.

Tabela 2 – Composição química dos substratos coletados abaixo dos depósitos (%).

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	MnO	TiO ₂	SO ₃	P ₂ O ₅	Outros	PF
Depósito 1	66,96	18,25	2,21	0,43	2,79	0,00	1,03	0,00	0,25	0,44	0,00	0,00	7,55
Depósito 2	65,30	15,74	7,57	0,20	0,24	0,00	0,63	0,00	1,13	0,48	0,12	0,08	8,51
Depósito 3	60,70	17,26	4,83	4,18	1,04	1,55	4,89	0,00	0,98	0,52	0,18	0,15	3,73
Depósito 4	75,43	8,46	1,86	3,88	0,97	1,89	2,25	0,00	0,43	0,52	0,00	0,07	4,24
média	67,10	14,93	4,12	2,17	1,26	0,86	2,20	0,00	0,70	0,49	0,08	0,08	0,86
mediana	66,13	16,50	3,52	2,155	1,005	0,775	1,64	0,00	0,705	0,5	0,06	0,075	5,89
desv. pad	6,15	4,43	2,66	2,15	1,08	1,00	1,92	0,00	0,42	0,04	0,09	0,06	2,38
mínimo	60,70	8,46	1,86	0,20	0,24	0,00	0,63	0,00	0,25	0,44	0,00	0,00	3,73
máximo	75,43	18,25	7,57	4,18	2,79	1,89	4,89	0,00	1,13	0,52	0,18	0,15	8,51

Tabela 3 – Composição química dos solos testemunhos (%).

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	MnO	TiO ₂	ZrO ₂
Solo Testemunho 1	53,02	40,12	5,3	0,22	0,69	-	-	-	0,60	0,02

Solo Testemunho 2	67,55	20,30	4,62	2,62	1,55	1,20	1,21	0,07	0,82	0,06
-------------------	-------	-------	------	------	------	------	------	------	------	------

4.2.3 Umidade, pH e Condutividade

A Instrução Normativa (IN) nº 011/16 do Instituto Estadual de Recursos Hídricos e Meio Ambiente do Espírito Santo - IEMA (ESPÍRITO SANTO, 2016) regulamenta que os resíduos depositados têm que ter umidade inferior a 30%. O controle de umidade é importante devido a possível liberação de substâncias químicas para o meio ambiente. Observa-se na Figura 10 que os depósitos 1, 2 e 3 atendem essa condicionante e que os substratos abaixo dos depósitos também possuem umidade de até 25%. Já o depósito 4 em que a deposição ocorreu em lugar e de forma inapropriada apresenta umidade de até 51% aproximadamente.

Nos depósitos estudados, a umidade dos resíduos variou no depósito 1 de 12,16% a 25,40%, no depósito 2 de 19,37% a 24,20%, no depósito 3 de 10,23% a 30,17% e no depósito 4 de 19,07% a 51,07%, enquanto a umidade dos substratos foi de 12,90% no depósito 1, 14,20% no depósito 2, 19,92% no depósito 3 e 24,60% no depósito 4.

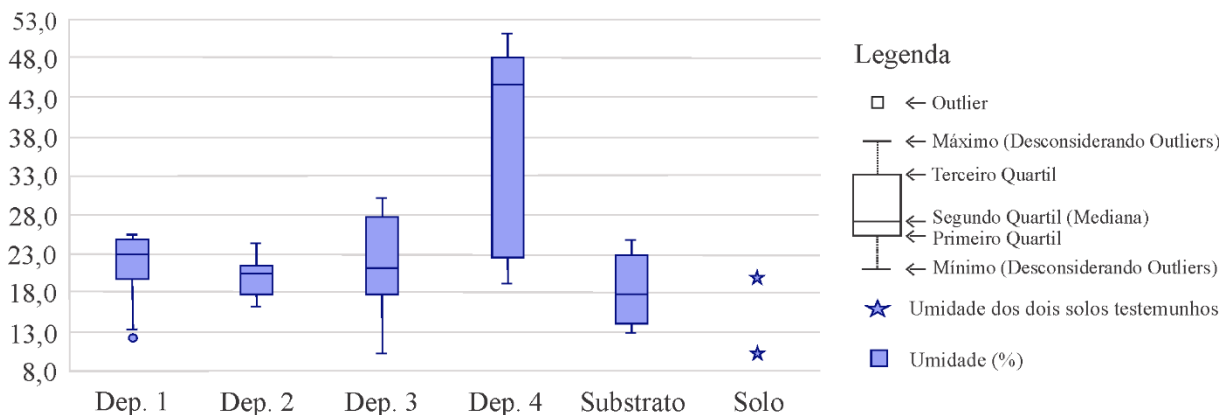


Figura 10 - Teores de umidade dos resíduos, substratos e solos testemunhos.

Quanto a determinação do pH, os valores de pH-1 dos resíduos variam de 8,36 a 9,88, pH-2 de 6,96 a 9,67 e o pH do extrato solubilizado varia de 7,17 a 9,09. Para os valores dos substratos, os valores de pH-1 está entre 7,5 e 9,8, pH-2 entre 7,89 e 9,64 e o pH do extrato solubilizado encontra-se entre 7,11 e 8,41. Já para os valores dos solos testemunhos o pH-1 representa 8,77 e 8,85, pH-2 8,97 e 8,88 e o pH do extrato solubilizado é de 7,09 e 7,11 (Figura 11)

O pH-1 medido no primeiro momento em que mistura o resíduo com água deionizada é o que atinge valores maiores comparados aos valores de pH-2 medido após 30 minutos e ao pH do extrato solubilizado e mesmo esses valores sendo maiores comparativamente, atingem no máximo 9,88, sendo classificado como não corrosivo de acordo com a NBR 10004 (ABNT,

2004). Observa-se também os valores de pH tanto dos resíduos como dos substratos e solos testemunhos tendem a diminuir com o tempo assim como também foi observado por Neves *et al.* (2013), o que é um fator positivo do ponto de vista ambiental pois o pH pode ser o responsável por liberar ou não metais tóxicos para o meio ambiente (NEVES *et al.*, 2019).

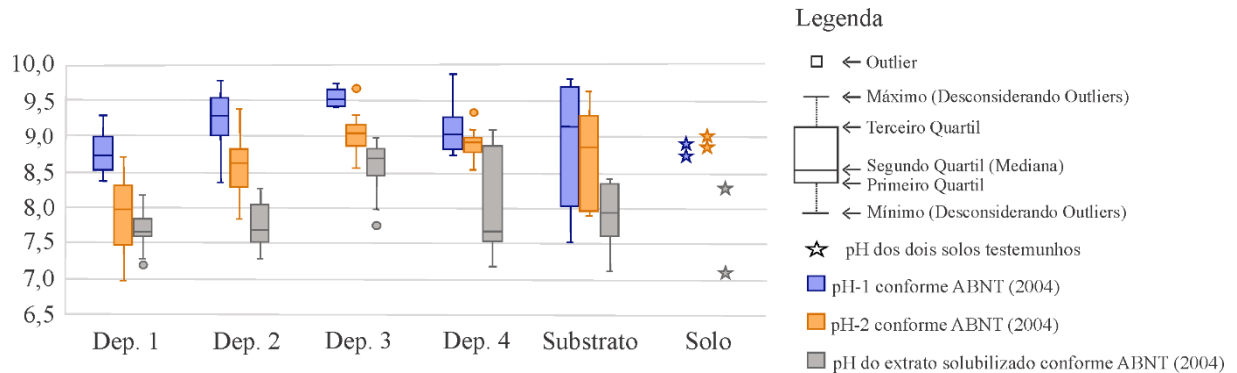


Figura 11 - pH dos resíduos, substratos e solos testemunhos de acordo a ABNT (2004).

A condutividade elétrica (CE) dos resíduos possui alta variabilidade, atingindo de $220\mu\text{S}$ no depósito 1 até $2420\mu\text{S}$ no depósito 4. Quanto aos valores para os substratos, a CE varia de $129,8\mu\text{S}$ a $1565\mu\text{S}$ e nos solos testemunhos não ultrapassa $511\mu\text{S}$ (Figura 12). Este parâmetro está relacionado aos íons dissolvidos na fase aquosa como Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , HCO_3^- , NO_3^- , SO_4^{2-} e CO_3^{2-} (CORWIN *et al.*, 2005), sendo que os íons como Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} estão presentes nos resíduos estudados, principalmente no depósito 4, que são resíduos do polimento de mármore. É importante mencionar que entre os depósitos 3 e 4, há presença de um córrego que possivelmente é uma fonte poluente pelo esgoto urbano. Os substratos abaixo dos depósitos 3 e 4 apresentam CE mais alta comparados aos substratos dos depósitos 1 e 2 aos solos testemunhos.

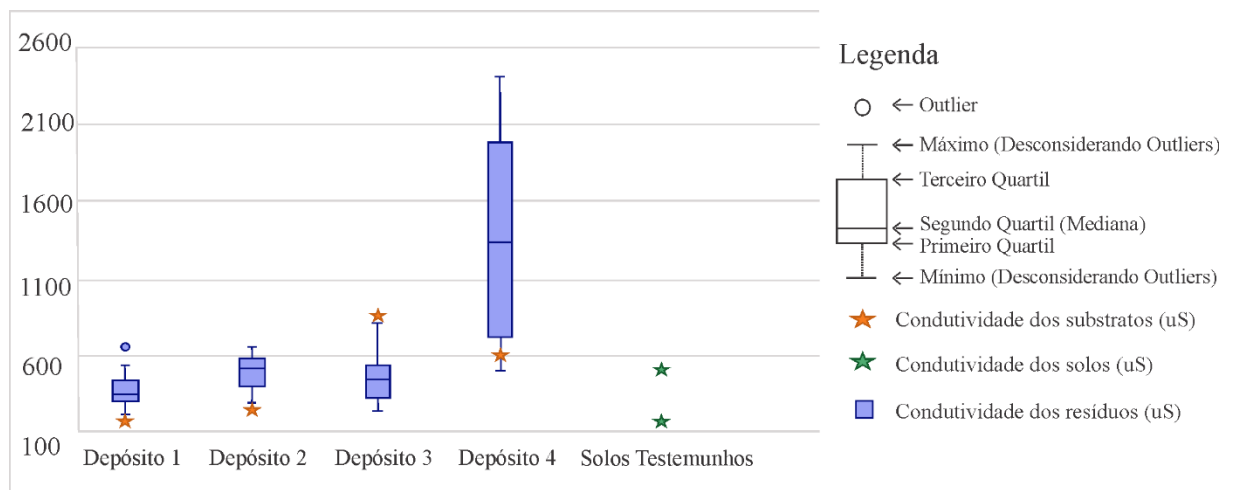


Figura 12 – Condutividade elétrica dos resíduos, substratos e solos testemunhos.

4.2.4 Eletrorresistividade

Os perfis de eletrorresistividade foram utilizados para auxiliar na estimativa de profundidade por meio da inferência da profundidade dos depósitos e compreender a resposta que o resíduo apresenta quanto a resistividade relacionando com a umidade. Junto ao levantamento geofísico, foi realizada a coleta de amostras, atingindo o substrato abaixo do depósito em pelo menos um furo em cada local estudado, estes depósitos são denominados de depósito 1, depósito 2, depósito 3, depósito 4 (Figura 4). Dessa forma, foi inferido o contato entre o resíduo e o solo, representado pela linha tracejada nos perfis da Figura 14. A profundidade dos depósitos analisados por meio desse método ficou entre 4 e 12 metros.

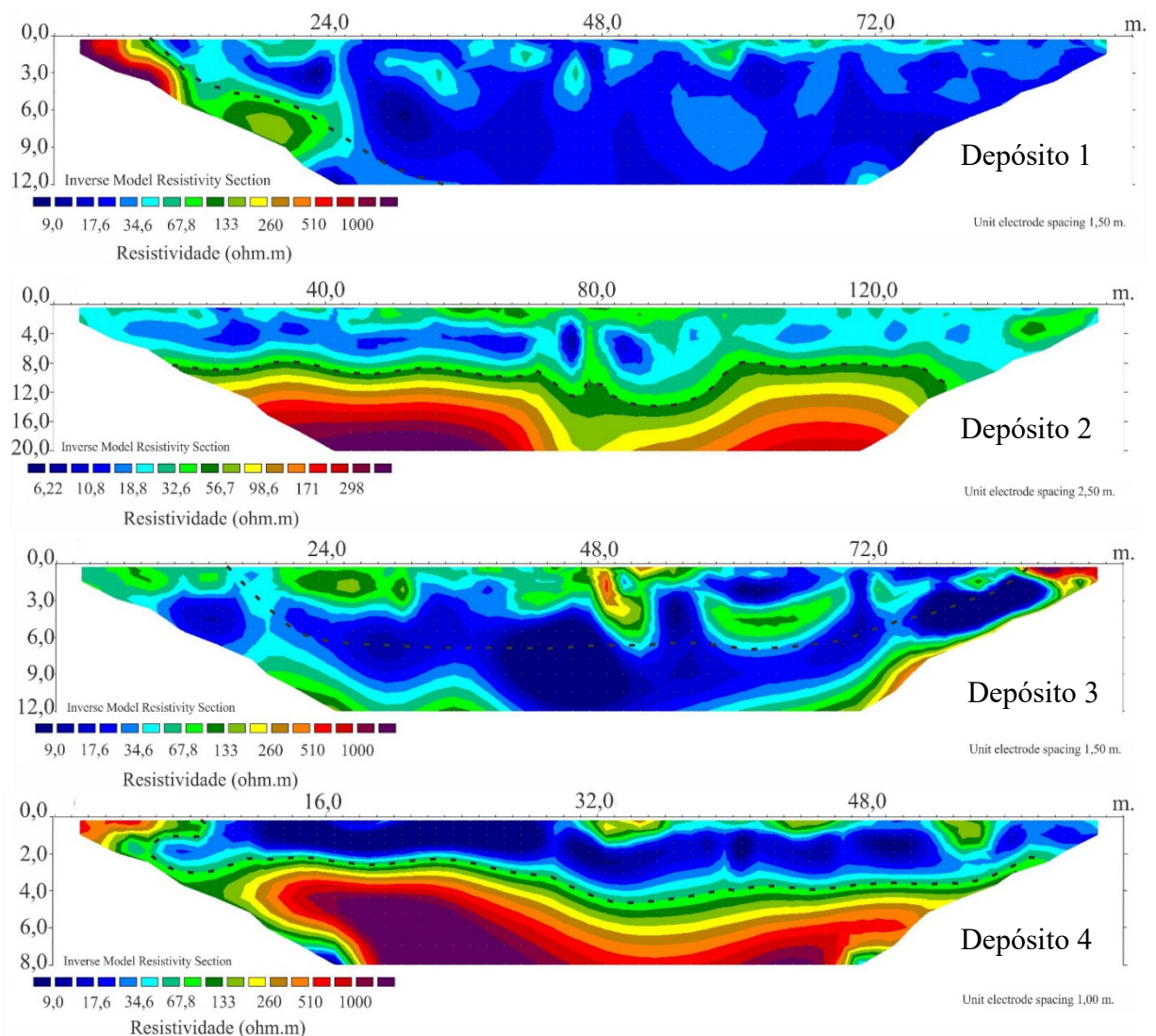


Figura 13 - Perfis de eletrorresistividade de quatro depósitos selecionados, usados para estimativa da profundidade e inferência da profundidade do solo (linha preta tracejada).

Os perfis de eletrorresistividade mostram que os resíduos retêm água entre as partículas, o que causa a baixa eletrorresistividade do material (identificada nos tons de azul – Figura 13). As porções com eletrorresistividade média (tons verdes) indicam locais com menor teor de umidade próximo à superfície e na base do depósito, onde identifica-se a presença do solo. Essa constatação é apoiada pela amostra coletada, pois ali aparece o solo no furo que atingiu a base do depósito.

O Depósito 3 (Figura 13c) mostra um padrão diferente, pois há porções de alta eletrorresistividade dentro do pacote de resíduos e, ao contrário, o solo apresenta baixa resistividade e alto teor de umidade. Diferente dos depósitos 1 e 2, o depósito 3 é um lançamento clandestino às margens de um córrego. Ali, o lençol freático é raso e o substrato é constituído por sedimentos aluviais arenosos, por isso a presença de água na base do depósito. As porções de média resistividade no interior do depósito possivelmente refletem a presença de materiais mais resistentes, como pedaços de chapas de rocha e outros resíduos que foram lançados junto ao resíduo de LBRO. Não foi possível coletar amostras com trado mecânico nessas porções mais resistivas, mas a hipótese de outros materiais misturados à lama é plausível pois há muito entulho na superfície do terreno.

4.2.5 Liberação de Elementos por Solubilização

Os resultados dos extratos solubilizados dos resíduos e substratos abaixo dos depósitos pelo ICP-OES estão apresentados na Tabela 4. Os teores obtidos de Cr, Cu, Zn, Cd, Ni e Co ficaram baixo do limite de detecção do equipamento e por este motivo não foram apresentados. Salienta-se que os teores de Cr, Cu e Zn mesmo com valores abaixo do limite de detecção, são valores menores do que os determinados pela NBR 10004 (ABNT, 2004) e que os teores de Ni, Ca, Mg e Ti não são elementos utilizados para classificação do resíduo por esta normativa. Porém, as concentrações de Cd e Pb apresentam limite de detecção maior do que os valores determinados pela NBR 10004 (ABNT, 2004), obtendo-se um resultado inconclusivo em algumas amostras, podendo ou não, haver contaminação destes elementos.

De acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004), resíduos classificados como não inertes podem apresentar biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água. Neste caso, o Al e o Fe são os principais responsáveis pela classificação como não inerte, enquanto o Mn apresenta-se acima do limite da normativa em apenas duas amostras e o Ba em quatro amostras, sendo todas as quatro pertencentes ao depósito 4 que é o único depósito que tem somente resíduos do polimento de mármore.

Observa-se também que de 46 amostras de resíduos 14 são classificadas como não inertes de acordo com os parâmetros estabelecidos pela normativa e das 4 amostras de substrato, apenas uma é classificada como inerte.

Outro fator importante a ser apresentado é que as amostras de resíduos do mesmo furo logo acima do substrato dos depósitos 1, 3 e 4 também foram classificadas como não inertes.

Tabela 4 – Elementos liberados pelo extrato solubilizado – NBR 10006 (ABNT, 2004) (valores em ppm). Em negrito, evidenciam-se as amostras classificadas como não inerte e as de coloração alaranjada são as amostras de substrato.

	Al	Fe	Mn	Ba	Pb	Ca	Mg	Ti
Limite detecção	0,0367	0,0031	0,0078	0,0277	0,0438	0,0255	0,0004	0,0022
Limite Inerte ABNT	0,2	0,3	0,1	0,7	0,01	não há	não há	não há
BRANCO	AD	AD	AD	AD	AD	AD	0,0027	AD
DEPÓSITO 1	AD	AD	AD	AD	AD	10,75	0,288	AD
	0,2698	0,2728	AD	AD	AD	8,63	0,2875	AD
	AD	0,0322	AD	AD	AD	23,17	1,693	0,0091
	0,1202	0,0605	AD	AD	AD	23,17	3,101	0,0148
	AD	AD	AD	AD	AD	23,01	1,247	AD
	0,0907	0,0642	AD	AD	AD	23,17	5,07	AD
	2,798	0,4733	AD	AD	AD	19,44	0,63	0,0482
	0,2118	0,126	AD	AD	AD	13,11	1,715	AD
	0,1203	0,1379	AD	AD	AD	13,9	0,224	AD
	7,38	5,13	0,0092	AD	AD	9,95	0,876	0,0803
	87,9	20,89	0,703	0,2315	0,1133	9,41	1,658	0,556
	0,0376	0,0536	AD	AD	AD	16,4	5,01	0,0036
	0,675	0,896	AD	AD	AD	9,99	3,532	0,008
	0,561	0,589	AD	AD	AD	9,44	1,433	0,0081
	35,07	8,19	0,0923	0,1257	AD	11,23	1,181	0,3917
DEPÓSITO 2	AD	AD	AD	AD	AD	13,05	9,86	0,0037
	AD	AD	AD	AD	AD	19,68	6,8	0,0031
	AD	0,0044	AD	AD	AD	23,17	5,29	0,0057
	0,0596	AD	AD	AD	AD	23,17	1,201	AD
	AD	AD	AD	AD	AD	31,09	1,003	AD
	AD	AD	AD	AD	AD	31,11	3,992	AD
	AD	AD	0,0147	AD	AD	29,28	10,09	AD
	0,0488	0,0074	AD	AD	AD	23,17	2,979	0,0068
	AD	0,0312	AD	AD	AD	17,71	10,8	AD
	0,0512	0,0425	AD	AD	AD	23,17	3,083	AD
	0,1324	0,0743	AD	AD	AD	23,17	1,899	0,0063
	AD	0,0212	AD	AD	AD	23,17	1,243	AD
	AD	0,0585	AD	AD	AD	23,89	14,06	AD
	AD	AD	AD	AD	AD	29,28	1,282	AD
	AD	AD	AD	AD	AD	30,29	0,954	AD
0,3064	0,2217	AD	AD	AD	23,17	1,5	0,0062	
AD	AD	AD	AD	AD	30,3	1,483	AD	

	AD	0,0123	AD	AD	AD	12,71	0,721	AD
	0,4347	0,2581	AD	AD	AD	7,72	4,333	0,0041
	AD	AD	AD	AD	AD	14,67	12,33	AD
	AD	0,0071	AD	AD	AD	6,41	12,06	AD
DEPÓSITO 3	AD	AD	AD	AD	AD	7,1	8,63	AD
	1,024	0,825	AD	AD	AD	5,29	4,797	0,0238
	15,18	14,99	0,694	0,2912	AD	13	7,67	0,0993
	22,79	24,47	0,0501	0,0891	AD	3,422	3,673	1,039
	AD	AD	AD	0,1798	AD	20,44	12,3	0,0041
	AD	AD	AD	0,504	AD	22,67	12,29	AD
	AD	AD	AD	0,608	AD	22,39	12,29	AD
DEPÓSITO 4	AD	0,0166	AD	0,873	AD	21,91	12,3	AD
	AD	AD	AD	1,157	AD	16,74	12,29	AD
	AD	0,0427	AD	0,1991	AD	14,16	12,31	AD
	AD	AD	AD	1,234	AD	23,17	12,29	AD
	AD	AD	0,0126	1,285	AD	23,17	12,29	AD
	AD	0,0133	0,0759	AD	AD	23,17	12,29	AD

*AD = Abaixo do limite de detecção.

4.3 Possibilidades de Uso dos Resíduos no Setor de Construção Civil

Tendo em vista a grande quantidade de resíduo de LBRO gerada no ano de 2019 estimado em 3.111.848 m³ e considerando sua composição química e física espera-se que esse material tenha potencial de aproveitamento em outras linhas de produção. No levantamento realizado nesse trabalho, foram compilados dados publicados em periódicos científicos, que comprovam a adequabilidade do uso desse tipo de resíduo em cerâmica vermelha, concreto, cimento e argamassa, tijolos e vidrados.

Dentre os trabalhos consultados, 18 são dedicados à aplicação do resíduo como matéria-prima para produção de cerâmica vermelha. Nesses trabalhos, a composição da massa cerâmica geralmente envolve argila com porcentagens diferentes da LBRO gerada no beneficiamento de rochas silicáticas (referidas como granitos) (e.g. VIEIRA et al., 2004; SULTANA et al., 2015; MOREIRA et al., 2008; PRADO et al., 2012). Outros acrescentam quartzo, feldspato e calcita (MENEZES et al., 2005) na massa cerâmica; caulim, *grog*, bentonita e *loess* (HOJAMBERDIEV et al., 2011) ou caulim, quartzo e feldspato sódico (SOUZA et al., 2010a). As porcentagens de resíduo acrescentadas à massa variam entre 10% (MOREIRA et al., 2003; TORRES et al., 2009; RODRIGUES et al., 2012) e 60% em peso (REIS et al., 2015; TAGUCHI et al., 2014). Segadães et al. (2005) utilizam 30% de resíduo do processamento de rochas silicáticas e carbonáticas (mármore) na massa cerâmica e afirmam que foi possível diminuir a temperatura de sinterização tradicional. Também com essa mistura, mas na proporção de 50%,

Acchar et al. (2006) relatam melhora nas características dos corpos cerâmicos. Isso porque os resíduos promovem o acondicionamento físico dos grãos (REIS et al., 2015) e maior estabilidade dimensional para as placas cerâmicas (MOREIRA et al., 2003; TAGUCHI et al., 2015). Por outro lado, o resíduo reduz a plasticidade da massa (MOREIRA et al., 2008), o que pode causar possíveis problemas na conformação dos produtos cerâmicos (SILVA et al., 2005). As temperaturas de sinterização utilizadas nos testes são variáveis, desde 900°C (RODRIGUES et al., 2012 – que utilizam 10% de resíduo silicático na massa argilosa) até 1.150°C (SILVA et al., 2005 – que utilizam até 50% de resíduo). El-Maghraby et al. (2011) usam temperaturas mais altas, que chegam a 1.220°C; enquanto Souza et al. (2010a) usam uma faixa de 950 a 1.250°C, mesmo acrescentando componentes fundentes na massa. A compilação aqui realizada não permite apontar a porcentagem ótima de resíduo para uma temperatura de sinterização mínima ideal, provavelmente devido à grande variabilidade composicional dos materiais e diferentes condições experimentais.

Também foram compilados dados de 29 trabalhos que testaram o resíduo da LBRO para uso em concreto, cimento e argamassa. Esse aproveitamento foi considerado extremamente relevante do ponto de vista econômico e ambiental, tendo em vista a grande quantidade que seria aproveitada e a redução no consumo de cimento. Os trabalhos consultados geralmente fazem a substituição do cimento por porcentagens diferentes de resíduo do processamento de rochas granitoides (e.g. GONÇALVES et al., 2002; SINGH et al., 2016; MEDINA et al., 2017; MITTRI et al., 2018), carbonáticas (e.g. Al-ZBOON & Al-ZOUBY, 2015; RANA et al., 2015) ou de misturas entre esses dois tipos (SADEK et al., 2016; GHORBANI et al., 2018). Diferente dos citados, Allam et al. (2014) substituem a areia, e não o cimento, por resíduo do processamento de granito. No uso de resíduos silicáticos, as porcentagens testadas variam de 5% (e.g. BACARJI et al., 2013; ELMOATY, 2013; ULIANA et al., 2015) até 50% (SADEK et al., 2016; SOLTAN et al., 2016). A faixa também é ampla no uso de resíduos de mármore, variando também entre 5% (ALMEIDA et al., 2007) e 50% (YEN et al., 2011 – acrescentando outros tipos de resíduos); agregando-se também resíduo de granito (GHORBANI et al., 2018), sílica ativa (KHODABAKHSHIAN et al., 2018) e superplastificantes (SARDINHA et al., 2016) na mistura para concreto. Para uso em argamassa, recomendam resíduos silicáticos na proporção de 10% (MÁRMOL et al., 2010) a 40 % (AZEVEDO et al., 2019), bem como de mármore (BUYUKSAGIS et al., 2017). Alguns estudos mostram que a densidade e a resistência à compressão dos compostos de cimento diminuem com o aumento do teor de resíduo (SARDINHA et al., 2016), enquanto outros (MASHALY et al., 2016; BUYUKSAGIS et al.,

2017) observam que a porosidade aparente aumenta com o teor de resíduo de mármore. Estes fatores podem impactar diretamente na resistência das argamassas (AZEVEDO et al., 2019).

No caso dos tijolos, foram compilados dados de 8 trabalhos científicos. A maioria mostra a possibilidade de uso de resíduos de mármore cálcicos e magnesianos (HAMZA et al., 2011; ELICHE-QUESADA et al., 2012; FRANÇA et al., 2018; BARROS et al., 2020), mas também testam misturas de resíduos de granito e mármore (HAMZA et al., 2011), de traquito e de basalto (MANCA et al., 2014). O tijolo ecológico produzido por Barros et al. (2020) apresentou alta resistência à compressão 350% maior do que o estabelecido pela norma, além de baixa absorção de água, resistência ao fogo e boa estabilidade térmica. Estes autores indicam o uso de até 90% de resíduo com 10% de resina de poliéster. França et al. (2018) estudam misturas de resíduo e cimento analisando os parâmetros de resistência mecânica, absorção de água e durabilidade, obtendo características superiores quando comparadas aos tijolos sem adição de resíduo. Dentre os trabalhos consultados, Lima et al. (2010) é o único que relata resultados negativos para esse tipo de uso.

Foram encontrados 5 trabalhos em periódicos científicos que testam o uso de resíduo da LBRO em vidrados e que apresentam dados composicionais. Lu et al. (2018) usam resíduo do processamento de rocha granítica para produção de cerâmica vítrea, acrescentando aditivos para sinterização e hidrolisados; enquanto Torres et al. (2004) usam uma mistura de 50% em argila com resíduo com mais de 70% de SiO₂. Silva et al. (2019) testa a fabricação de porcelana acrescentando 10% de resíduo de quartzito, com 80% de SiO₂. Souza et al. (2010b) analisa uma mistura de 47,5% de resíduo de gnaiss (rocha metamórfica silicática) com caulim e quartzo, substituindo feldspato potássico. O trabalho de Kim & Park (2020) é o único que testa o resíduo de mármore (baixa sílica, alto carbonato de cálcio e alta perda ao fogo), mas usa junto a vários outros tipos de resíduo (rejeito da mineração de ouro, lama vermelha e rejeito de ferro-níquel). Esses trabalhos apontam resultados positivos, mas é importante observar que os teores de sílica exigidos geralmente são mais altos e os de ferro mais baixos, ou seja, recomenda-se o uso de resíduos oriundos de teares de fios diamantados (ou multifios).

Na Figura 14, a composição química dos resíduos coletados nos depósitos estudados é comparada com a dos resíduos testados para uso em cerâmica vermelha (Uso 1), concreto, cimento e argamassa (Uso 2), tijolo (Uso 3) e vidrado e porcelana (Uso 4). Na leitura dos gráficos, considera-se que, quanto maior a amplitude das caixas (“box-plot”), maior a variabilidade dos teores de determinado constituinte aceitáveis para os usos indicados.

De maneira geral, os resíduos estudados nesse trabalho, identificados como “Depósitos” na Figura 14, possuem características químicas semelhantes às dos materiais estudados pelos

diversos autores que concluem a adequabilidade de seu uso nos casos cujos dados foram compilados.

O Fe_2O_3 , que seria um fator limitante a diversos usos por induzir ferruginação e pigmentação nos produtos, não aparece nos Depósitos de forma muito diferente dos teores medidos nos materiais testados. Em uma das amostras testadas para o uso 2 (concreto/cimento/argamassa), há um valor anômalo de ferro, muito acima do valor máximo medido nas amostras dos Depósitos, sem que isso produzisse um resultado negativo no teste. Porém, o uso 4 (vidrados) é o mais restritivo para o teor desse elemento, indicando necessidade de triagem para permitir o aproveitamento em vidrados.

Os usos 2 e 3 (concreto/cimento/argamassa e tijolos) são os menos restritivos quanto à composição química, ou seja, a variabilidade de teores é maior do que aquela encontrada nos depósitos estudados. Importante relatar, porém, que no uso 2 (concreto/cimento/argamassa), o teor de MgO é mais restritivo, isto ocorre porque este componente, ao ser hidratado, pode se expandir e gerar porosidade em uma estrutura rígida de concreto (SALOMÃO & PANDOLFELLI, 2008). Esta seria uma propriedade que limitaria o uso dos resíduos depositados, indicando a necessidade de triagem para evitar introduzir resíduos ricos em MgO neste tipo de aplicação. Contudo, considerando-se que geralmente esse constituinte provém dos mármores e seu teor é muito baixo em rochas granitoides, a separação é facilitada e pouparia também a desagregação de valor ao resíduo de mármore, que pode ter aplicações mais nobres já que constitui um “calcário” finamente moído.

Os teores de Na_2O se evidenciam no uso 2, devido à sua variabilidade, podendo atingir até 5,92%, e nos Depósitos, os valores estão entre 1,07% e 4,47% (Figura 8). O estudo de Mittri et al. (2018) relata que, embora a normativa para o uso em pozolona determine o teor máximo de Na_2O em 1,5%, o teor de álcalis disponível em Na_2O em seu experimento foi de 2,21%, sem comprometer sua ação na atividade pozolânica. No entanto, apontam para a necessidade de se atentar para uma concentração de álcalis excessiva, pois pode ocorrer reação álcali-sílica com a sílica ativa existente nos agregados (MITTRI et al., 2018).

Para o uso 4 (vidrados), as matérias primas geralmente são ricas em sílica. Os teores de sílica livre (quartzo) em rochas são inversamente proporcionais ao cálcio e magnésio, além da perda ao fogo, que é mais baixa em rochas granitoides do que nas carbonáticas. Assim, a separação de resíduos provenientes da serragem de “granitos” e de mármores, aparece novamente como um critério mínimo de segregação de resíduos visando ao seu uso mais nobre. Outrossim, ressalta-se novamente a importância dos resíduos com baixo ferro, ou seja, aqueles

provenientes da serragem em teares de fios diamantados ou multifios, os quais não deveriam ser misturados com aqueles provenientes de teares convencionais.

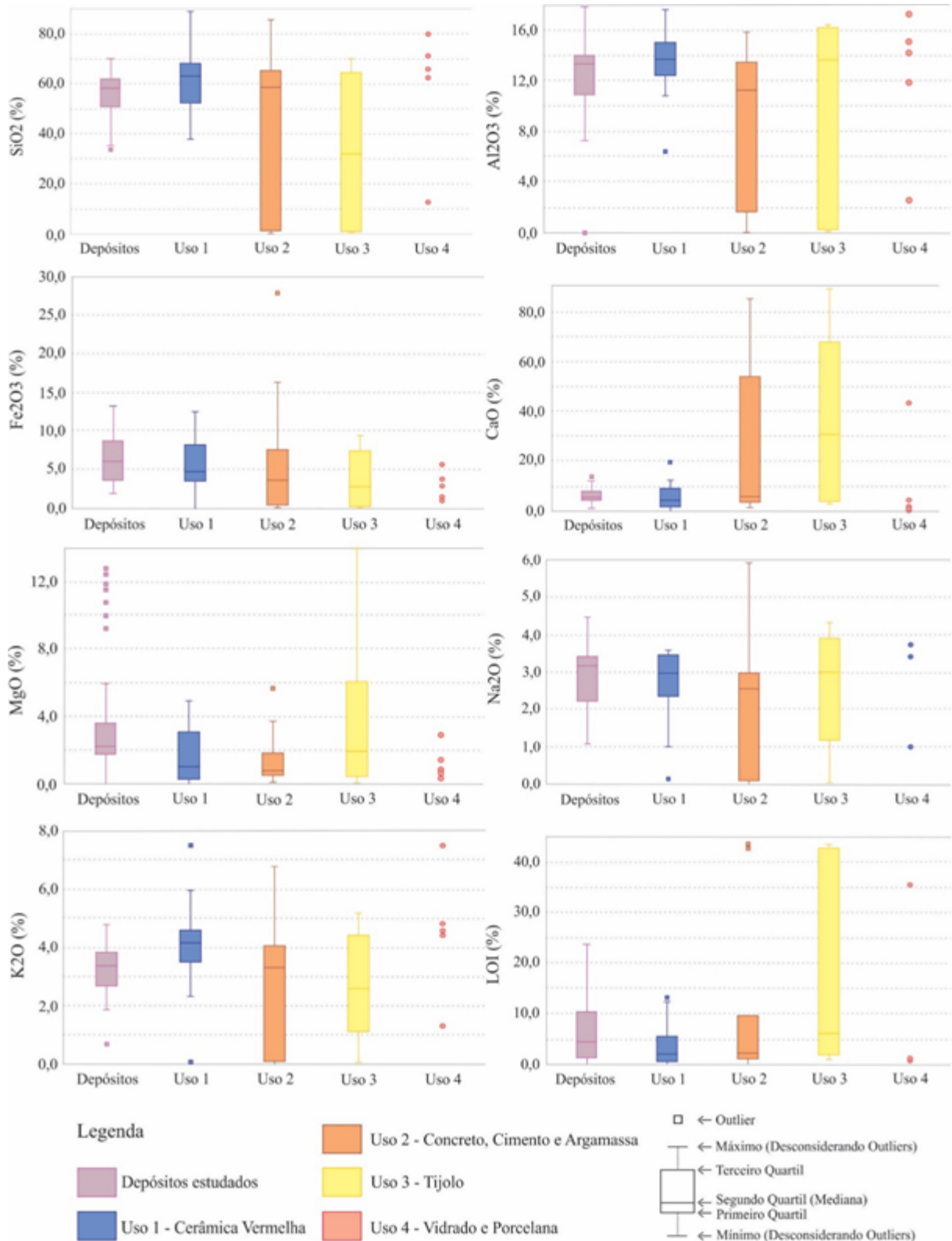


Figura 14 - Comparação da composição química principal dos resíduos investigados em comparação com a composição de resíduos já testados e/ou utilizados em aplicações.

5. Conclusões

Os resíduos de LBRO armazenados nos depósitos estudados neste trabalho foram classificados como resíduos não perigosos inertes e não inertes com base nos parâmetros de alumínio, bário, cádmio, chumbo, cobre, cromo, ferro, manganês, zinco. Os parâmetros alumínio, bário, ferro e manganês foram os responsáveis pelo enquadramento de 17 amostras como não-inertes, dentre as 49 analisadas.

Os resíduos da LBRO possuem granulometria muito fina e, de acordo com a norma NBR 10004 (ABNT, 2004) em vigor, o pH é não corrosivo, com valores na faixa de 6,96 a 9,88, além de ter uma tendência de estabilidade com o passar do tempo.

Observou-se também que os resíduos depositados em aterros licenciados (depósitos 1 e 2) apresentam umidade menor do que 30%, como é exigido pela Instrução Normativa nº16 do Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IEMA), enquanto um dos depósitos que estão em situação irregular (depósito 4), apresenta umidade superior à estabelecida pelo órgão ambiental devido ao tipo de resíduo depositado, sendo este o resíduo de polimento.

A granulometria muito fina dos resíduos contribui para sua capacidade de retenção de água, o que ocasiona a baixa eletrorresistividade do material. A resposta obtida pela eletrorresistividade, juntamente com os dados de condutividade elétrica, mostra que, além da influência do resíduo do polimento, há também a possível alteração do substrato abaixo dos depósitos 3 e 4 pelo esgoto urbano devido à presença de um córrego entre estes depósitos, enquanto nos depósitos 1 e 2 não se observa alterações das características originais do solo. Portanto, desde que dispostos de acordo com as instruções normativas do IEMA, os resíduos de LBRO possuem baixo potencial de contaminação.

Os resíduos da LBRO apresentam, em sua composição química principal, SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , Fe_2O_3 , MgO , K_2O e Na_2O e a variabilidade de teores é semelhante à de matérias-primas comprovadamente aptas para uso na fabricação de cerâmica vermelha, concreto, cimento e argamassa, tijolos e vidrados. Um tratamento prévio (p. ex.: homogeneização; secagem; moagem; classificação; retirada de Fe) do resíduo, dependendo da aplicação será necessário para garantir o controle de qualidade da matéria-prima, com consequente agregação de valor.

Frente à grande quantidade existente de resíduo da LBRO, além da compatibilidade química com o uso em diferentes setores industriais, torna-se inquestionável a relevância do tratamento e separação dos resíduos, tanto do ponto de vista econômico quanto ambiental. Sua composição química-mineral e a estabilidade físico-química permitem sua aplicação em vários setores da indústria, barateando assim custos de produção e reduzindo gastos com os insumos.

6. Referências Bibliográficas

- ABIROCHAS – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS. **Balço das Exportações e Importações Brasileiras de Rochas Ornamentais em 2019**. Brasília: Informe ABIROCHAS, 2020a. 20 p.
- ABIROCHAS – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS. *Síntese das Exportações e Importações Brasileiras de Rochas Ornamentais no 1º Trimestre de 2020*. Brasília: Informe ABIROCHAS, 2020b. 11p.
- ABIROCHAS - Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais. **Síntese das Exportações e Importações Brasileiras de Rochas Ornamentais de Janeiro a Setembro de 2020**. Informe 03/2020. Brasília, DF. 2020c, 7 p.
- ACCHAR, W.; VIEIRA, F. A.; HOTZA, D. Effect of marble and granite sludge in clay materials. **Materials Science and Engineering**, v. 419, p. 306-309, 2006.
- AGUIAR, L. L., TONON, C. B., NUNES, E. T., BRAGA, A. C. A., NEVES, M. A., DAVID, J. A. O. Mutagenic potential of fine wastes from dimension stone industry. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 125, p. 116-120, 2016.
- ALMEIDA, N.; BRANCO, F.; SANTOS, J. R. Recycling of stone slurry in industrial activities: Application to concrete mixtures. **Building and Environment**, v. 42, p. 810-819, 2007.
- ALLAM, M. E.; BACKHOUM, E. S.; GARAS, G. L. Re-use of granite sludge in producing green concrete. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, v. 9, n. 12, p. 2731- 2737, 2014.
- AL-ZBOON, K.; AL-ZOU'BY, J. Recycling of stone cutting slurry in concrete mixes. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 17, p. 324-335, 2015.
- AZEVEDO, A. R. G.; MARVILA, M. T.; BARROSO, L. S.; ZANELATO, E. B.; ALEXANDRE, J.; XAVIER, G. C.; MONTEIRO, S. N. Effect of granite residue incorporation on the behavior of mortars. **Materials**, v. 12, n. 9, p. 1449-1163, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004/04**. Classificação de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10005/04**. Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10006/04**. Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10007/04**. Amostragem de resíduos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- BACARJI, E.; FILHO, R. D. T.; KOENDERS, E. A. B.; FIGUEIREDO, E. P. LOPES, J. L. M. P. Sustainability perspective of marble and granite residues as concrete fillers. **Construction and Building Materials**, v. 45, p. 1-10, 2013.
- BARROS, M. M.; OLIVEIRA, M. F. L.; RIBEIRO, R. C. C.; BASTOS, D. C.; OLIVEIRA, M. G. Ecological bricks from dimension stone waste and polyester resin. **Construction and Building Materials**, v. 232, p. 117-252, 2020.
- BERTOSSI, A. P. A.; CARDOSO, M. S. N.; PRADO, A. C. A.; POLIDORO, J. C.; GARCIA, G. O.; NEVES, M. A. Influência de resíduo de serragem de mármore na condutividade hidráulica do solo e na qualidade da água. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 34, n. 1, 2011.
- BERTOSSI, A. P. A.; NEVES, M. A.; CARDOSO, M. S. N.; PRADO, A. C. A.; DAMASCENO, C. A.; POLIDORO, J. C. Influência da utilização do resíduo fino de beneficiamento de rochas ornamentais silicáticas na qualidade do solo e da água. **Geociências**, v. 31, n. 2, p. 185-195, 2012.
- BRAGA, F. S.; BUZZI, D. C.; COUTO, M. C. L.; LANGE, L. C. Caracterização ambiental de lamelas de beneficiamento de rochas ornamentais. **Engenharia Sanitária Ambiental**, v.15, n.3, p. 237-244, 2010.

- BUYUKSAGIS, I. S.; UYGUNOGLU, T.; TATAR, E. Investigation on the usage of waste marble powder in cement-bases adhesive mortar. *Construction and Building Materials*, v. 154, p.734-742, 2017.
- BUZZI, D. C. Estudo de Classificação e Quantificação das Lamas Geradas no Processo de Beneficiamento de Rochas Ornamentais. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória (ES), 2008. 365 p.
- CALMON, J.L.; SILVA, S.A.C. Mármore e Granito no Espírito Santo: problemas ambientais e soluções. **DOMINGUES, A.F.; BOSON, P.H.G.; ALÍPAZ, S. (Orgs.), A gestão de Recursos Hídricos e a Mineração. Brasília: Agência Nacional de Águas – ANA, Instituto Brasileiro de Mineração - IBRAM**, 2006. p. 199-231. Disponível em <http://www.ana.gov.br/AcoesAdministrativas/CDOC/CatalogoPublicacoes_2006.asp>. Acessado em: 29 janeiro 2020.
- CAMPOS, A.R; RIBEIRO, R. C. C.; CASTRO, N. F.; AZEVEDO, H. C. A.; CATTABRIGA, L. Resíduos: Tratamento e Aplicações Industriais. In: VIDAL, F. W. H.; AZEVEDO, H. C. A.; CASTRO, N. F. **Tecnologia de rochas ornamentais: Pesquisa, lavra e beneficiamento**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2014.
- CORWIN, D. L.; LESCH, S. M. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 46, p. 11-43, 2005.
- COSTA, A. S. V.; HORN, A. H.; DONAGEMMA, G. K.; SILVA, M. B. Uso do resíduo de granito oriundo da serraria e polimento como corretivo e fertilizante de solos agrícolas. **Geonomos**, v.18, n. 1, p. 23-27, 2010.
- ELICHE-QUESADA, D.; CORPAS-IGLESIAS, F. A.; PÉREZ-VILLAREJO, L. IGLESIAS-GODINHO, F. J. Recycling of sawdust, spent Earth from oil filtration, compost and marble residues for brick manufacturing. **Construction and Building Materials**, v. 34, p. 275-284, 2012.
- EL-MAGHRABY, HF.; EL-OMLA, M. M.; BONDIOLI, F.; NAGA, SM. Granite as flux in stoneware tile manufacturing. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 31, p. 2057-2063, 2011.
- ELMOATY, A. E. M. Mechanical properties and corrosion resistance of concrete modified with granite dust. **Construction and Building Materials**, v. 47, p. 743-752, 2013.
- FRANÇA, B. R.; AZEVEDO, A. R. G.; MONTEIRO, S. N.; FILHO, F. C. G.; MARVILA, M. T.; ALEXANDRE, J.; ZANELATO, E. B. Durability of Soil-Cement Blocks with the Incorporation of Limestone Residues from the Processing of Marble. **Materials Research**, v. 21, n. 1, 2018.
- FREDA, J. The effects of aluminium and other metals on amphibians. **Environmental Pollution**, v. 71, p. 305-328, 1991.
- FREITAS, J. J. G.; RAYMUNDO, V.; JESUS, H. C. Características químicas dos resíduos de serragem segregados de rochas ornamentais do estado do Espírito Santo. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 42, n. 3, 2012.
- GHORBANI, S.; TAJU, I.; TAVAKKOLIZADEH, M.; DAVODI, A.; BRITO, J. Improving corrosion resistance of steel rebars in concrete with marble and granite waste dust as partial cement replacement. **Construction and Building Materials**, v. 185, p. 110-119, 2018.
- GONÇALVES, A. D. M. A.; LIBARDI, P. L. Análise da determinação da condutividade hidráulica do solo pelo método do perfil instantâneo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 5, 2013.
- GONÇALVES, J. P.; MOURA, W. A.; MOLIN, D. C. C. D. Avaliação da influência da utilização do resíduo de corte e granito (RCG), como adição, em propriedades mecânicas do concreto. **Ambiente Construído**, v. 2, n. 1, p. 53-68, 2002.

- GONZÁLEZ, A. M. V. Modelización Geoquímica de los Serrines de Granito. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Química, Departamento de Química Analítica, Universidade da Coruña, Espanha. Coruña, 2005. 295 p.
- GOOGLE EARTH PRO – MAPAS. Disponível em <https://www.google.com/earth/>. Acessado em 03 de janeiro de 2021.
- HAMZA, R. A.; EL-HAGGAR, S. KHEDR, S. Marble and Granite Waste: Characterization and Utilization in Concrete Bricks. **International Journal of Bioscience, Biochemistry and Bioinformatics**, v. 1, n.4, p. 286-291, 2011.
- HOJAMBERDIEV, M.; EMINOV, A.; XU, Y. Utilization of muscovite granite waste in the manufacture of ceramic tiles. **Ceramics International**, v. 37, p. 871-876, 2011.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Bases e Referenciais Cartográficos**. 2016. Disponível em: <<https://mapas.ibge.gov.br/bases-e-referenciais/bases-cartograficas/malhas-digitais.html>>. Acesso em: 15 out 2019.
- IEMA – INSTITUTO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS. **Instrução Normativa 011/2016: critérios e procedimentos técnicos para licenciamento da atividade de disposição de Lama do Beneficiamento de Rochas Ornamentais**. IEMA, Vitória (ES), 2016.
- JUCOSKI, G. O.; CAMBRAIA, J.; RIBEIRO, C.; OLIVEIRA, J. A. Excesso de ferro sobre o crescimento e a composição mineral em Eugenia uniflora L. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 47, n. 4, p. 720-728, 2016.
- JUNIOR, A. C.; SANTOS, R. P.; FERNANDEZ, P. G. M. Insumos utilizados em marmorarias. **Abirochas**, 2019. Disponível em: <<http://cms.academiadarocha.com.br/wp-content/uploads/2019/08/5d653f4ab1aa2.pdf>>. Acessado em 16 de abril de 2020.
- KABATA-PENDIAS, A. Trace Elements in Soils and Plants. 4. Ed. Boca Raton: CRC Press, 2011. 512p.
- KHODABAKHSHIAN, A.; BRITO, J.; GHALEHNOVI, M. SHAMSABADI, E. A.; Mechanical, environmental and economic performace of structural concrete containing sílica fume and marble industry waste powder. **Construction and Building Materials**, v. 169, p. 237-251, 2018.
- KIM, Y.; PARK, H. A value-added synthetic process utilizing mining wastes and industrial byproducts for wear-resistant glass ceramics. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 8, p. 2196-2204, 2020.
- LADEIRA, A. C.; PANIAGO, E. B.; DUARTE, H. A.; CALDEIRA, C. L. Especificação química e sua importância nos processos de extração mineral e de remediação ambiental. **Cadernos Temáticos de Química Nova na Escola**, nº 8, p. 18-23, 2014.
- LIMA, R. C. O.; NEVES, G. A.; CARVALHO, J. B. Q. Durabilidade de tijolos de solo-cimento produzidos com resíduo de corte de granito. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 5, n. 2, 2010.
- LU, J.; LI, Y.; ZOU, C.; LIU, Z.; WANG, C. Effect of sintering additives on the densification, crystallization and flexural strength of sintered glass-ceramics from waste granite powder. **Materials Chemistry and Physics**, v. 216, p. 1-7, 2018.
- MANCA, P. P.; ORRÚ, G.; DESOGUS, P. Recycling of sludge from ornamental stone processing as resource in civil constructions. **International Journal of Mining, Reclamation and Environment**, v. 29, p. 141-151, 2014.
- MANHÃES, J. P. V. T.; HOLANDA, J. N. F. Caracterização e classificação de resíduo sólido “pó de rocha granítica” gerado na indústria de rochas ornamentais. **Química Nova**, v. 31, n. 6, p. 1301-1304, 2008.
- MÁRMOL, I. BALLESTER, P. CERRO, S. MONRÓS, G. MORALES, J. SÁNCHEZ, L. Use of granite sludge wastes for the production of coloured cement-based mortars. **Cement & Concrete Composites**, v. 32, p. 617-622, 2010.

- MASHALY, A. EL-KALIOUBY, B.; SHALABY, B. N.; EL-GOHARY, A. M.; RASHWAN, M. A. Effects of marble sludge incorporation on the properties of cement composites and concrete paving blocks. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 731-741, 2016.
- MATHIELO, J. G.; JÚNIOR, A. C.; BONAMICO, E. A.; JÚNIOR, U. L. G. Produção Limpa e Riscos Ambientais. **ABIROCHAS**, 2019. Disponível em: <<http://cms.academiadarocha.com.br/wp-content/uploads/2019/08/5d653e1aa76ae.pdf>>. Acessado em 16 de abril de 2020.
- MEDINA, G.; BOSQUE, I. F. S.; FRÍAS, M.; ROJAS, M. I. S.; MEDINA, C. Granite quarry waste as a future eco-efficient supplementary cementitious material (SCM): scientific and technical considerations. **Journal of Cleaner Production**, v. 148, p. 467-476, 2017.
- MENEZES, R. R.; FERREIRA, H. S.; NEVES, G. A.; LIRA, H. L. L.; FERREIRA, H. C. Use of granite sawing wastes in the production of ceramic bricks and tiles. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 25, p. 1149-1158, 2005.
- MESQUITA, M. G. B. F.; MORAES, S. O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. **Ciência Rural**, v. 34, n. 3, 2004.
- MITTRI, S. H. M.; DEGEN, M. K.; VIEIRA, G. L.; VAZZOLER, J. S.; RODRIGUES, L. H. C. H. Análise da caracterização pozolânica do resíduo de rochas ornamentais tratado termicamente e seu efeito nas propriedades mecânicas de concretos. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, v. 11, n. 6, p. 1186-1207, 2018.
- MOLIN, J. P.; RABELLO, L. M. Estudos sobre a mensuração da condutividade elétrica do solo. **Engenharia Agrícola**, v. 31, n. 1, p. 90-101, 2011.
- MOREIRA, J. M. S.; FREIRE, M. N.; HOLANDA, J. N. F. Utilização de resíduo de serragem de granito proveniente do estado do Espírito Santo em cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v. 49, p. 262-267, 2003.
- MOREIRA, J. M. S.; MANHÃES, J. P. V. T.; HOLANDA, J. N. F. Processing of red ceramic using ornamental rock powder waste. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 196, p. 88-93, 2008.
- NEVES, M. A.; BORGES, S. P. T.; SOUZA, P. B. Classification and use of fine wastes from dimension stone industry. **Materials Science Forum Vols**, p. 1412-1417, 2012.
- NEVES, M. A.; NADAI, C. P.; FONSECA, A. B.; PRADO, A. C. A.; GIANNOTTI, J. G.; RAYMUNDO, V. pH e umidade dos resíduos finos de beneficiamento de rochas ornamentais. **Geociências**, v. 66, n. 2, p. 239-244, 2013.
- NEVES, M. A.; SANTOS, M. A. A. S.; TAGUCHI, S. P.; RANGEL, C. V. G. T.; RAYMUNDO, V. Interações ambientais e resistência física de um depósito de resíduos finos da indústria de rochas ornamentais. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 24, n. 4, 2019.
- OLIVEIRA, I. C. A. As Lamas Resultantes da Indústria Transformadora das Rochas Ornamentais: recuperação paisagística de um aterro superficial de lamas em Pêro Pinheiro (Sintra). Monografia de Conclusão de Curso, Curso de Arquitetura Paisagista, Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, 60 p. 2005.
- OLIVEIRA, T.; RIBEIRO, R. P.; MOREIRAS, T. F. Caracterização de lamas do corte de granitos com vista ao uso em obras geotécnicas. **Ciência & Engenharia**, v. 25, n. 2, 2016.
- PRADO, A. C. A.; BORGES, S. P. T.; NEVES, M. A. SOARES, R. H.; FONSECA, A. B. Use of fine wastes from dimension stone industry in the manufacture of ceramic tile. **Materials Science Forum**, v. 727-728, p. 703-709, 2012.
- RANA, A.; KALLA, P.; CSETENYI, L. J. Sustainable use of marble slurry in concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 94, p. 304-311, 2015.
- REIS, A. S.; DELLA-SANGRILLO, V. P.; VALENZUELA-DIAS, F. R. Analysis of dimension stone waste addition to the clayey mass used in root tile production. **Materials Research**, v. 18, n. 2, p. 63-69, 2015.

- RODRIGUES, D. V.; XAVIER, G. C.; SABOYA, F.; MAIA, P. C. A.; ALEXANDRE, J. Durabilidade de peças cerâmicas vermelhas com adição de rejeito de rocha ornamental isenta de granalha. **Cerâmica**, v. 58, p. 286-293, 2012.
- SADEK, D. M.; EL-ATTAR, M. M.; ALI, H. A. Reusing of marble and granite powders in self-compacting concrete for sustainable development. **Journal of Cleaner Production**, v. 121, p. 19-32, 2016.
- SALOMÃO, R.; PANDOLFELLI, V. C. Hidratação e desidratação de óxido de magnésio em concretos refratários. **Cerâmica**, v. 54, n. 330, p. 145-151, 2008.
- SANTOS, M. M. A.; DESTEFANI, A. Z.; HOLANDA, J. N. F. Caracterização de resíduos de rochas ornamentais provenientes de diferentes processos de corte e beneficiamento. **Revista Matéria**, v. 18, n. 04, p. 1442-1450, 2013.
- SARDINHA, M.; BRITO, J. RODRIGUES, R. Durability properties of structural concrete containing very fine aggregates of marble sludge. **Construction and Building Materials**, v. 119, p. 45-52, 2016.
- SEGADÃES, A. M.; CARVALHO, M. A.; ACCHAR, W. Using marble and granite rejects to enhance the processing of clay products. **Applied Clay Science**, v. 30, p. 42-52, 2005.
- SILVA, J. B.; HOTZA, D. SAGADÃES, A. M. ACCHAR, W. Incorporação de lama de mármore e granito em massas argilosas. **Cerâmica**, v. 51, p. 325-330, 2005.
- SILVA, K. R.; CAMPOS, L. F. A.; SANTANADA, L. N. Use of experimental design to evaluate the effect of the incorporation of quartzite residues in ceramic mass for porcelain tile production. **Materials Research**, v. 22, n. 1, 2019.
- SINGH, S.; NAGAR, R.; AGRAWAL, V. Performance of granite cutting waste concrete under adverse exposure conditions. **Journal of Cleaner Production**, v. 127, p. 172-182, 2016.
- SOLTAN, A. M. M.; KAHL, W. A.; EL-RAOLF, F. A.; EL-KALIOUBY, B. A. H.; SERRY, M. A. K.; ABDEL-KADER, N. A. Lightweight aggregates from mixtures of granite wastes with clay. **Journal of Cleaner Production**, v. 117, p. 139-149, 2016.
- SOUZA, A. J.; PINHEIRO, B. C. A.; HOLANDA, J. N. F. Processing of floor tiles bearing ornamental rock-cutting waste. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 210, p. 1898-1904, 2010a.
- SOUZA, A. J.; PINHEIRO, B. C. A.; HOLANDA, J. N. F. Recycling of gneiss rock waste in the manufacture of vitrified floor tiles. **Journal of Environmental Management**, v. 91, p. 685-689, 2010b.
- SULTANA, S. M.; AHMED, A. N.; ZAMAN, M. N.; RAHMAN, A. M.; BISWAS, P. K.; NANDY, P. K. Utilization of hard rock dust with red clay to produce roof tiles. **Journal of Asian Ceramic Society**, v. 3, n. 1, p. 22-26, 2015.
- TAGUCHI, S. P.; SANTOS, J. C.; GOMES, T. M. CUNHA, N. A. Avaliação das propriedades tecnológicas de cerâmica vermelha incorporada com resíduo de rocha ornamental proveniente do tear de fio diamantado. **Cerâmica**, v. 60, p. 291-296, 2014.
- TORRES, P.; FERNANDES, H. R.; AGATHOPOULOS, S. TULYAGANOV, D. U.; FERREIRA, J. M. F. Incorporation of granite cutting sludge in industrial porcelain tile formulations. **Journal of the European Ceramic Society**, v.24, p. 3177-3185, 2004.
- TORRES, P.; FERNANDES, H. R.; OLHERO, S. FERREIRA, J. M. F Incorporation of wastes from granite rock cutting and polishing industries to produce roof tiles. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 29, p. 23-30, 2009.
- ULIANA, J. G.; CALMON, J. L.; VIEIRA, G. L.; TEIXEIRA, J. E. S. L.; NUNES, E. Tratamento térmico da lama do beneficiamento de rochas ornamentais: aplicação como pozolana em matrizes cimentícias. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, v. 8, n. 2, p. 100-123, 2015.
- VASCONCELOS, F. M.; TUNDISI, J. G.; TUNDISI, T. M. **Avaliação da qualidade de água**. Belo Horizonte: SMEA, 2009, p. 40.

- VIEIRA, C. M. F.; SOARES, T. M.; SÁNCHEZ, R.; MONTEIRO, S. N. Incorporation of granite waste in red ceramics. *Materials Science and Engineering*, v. 373, p. 115-121, 2004.
- YEN, C. L.; TSENG, D. H.; LIN, T. T. Characterization of eco-cement parte produced from waste sludges. ***Chemosphere***, v. 84, p. 220-226, 2011