



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**RESÍDUOS FINOS DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS: OS
MATERIAIS DEPOSITADOS E OS SEGREGADOS**

MARCELLO CICILIOTE CHICON

ALEGRE, ES

2019

Marcello Ciciliote Chicon

**RESÍDUOS FINOS DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS: OS
MATERIAIS DEPOSITADOS E OS SEGREGADOS**

Dissertação de mestrado apresentado ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Química do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Química.

Área de Concentração: Engenharia Química

Linha de Pesquisa: Materiais, Bioprocessos e Meio Ambiente

Orientador: Prof.^a Dr.^a Mirna Aparecida Neves

Coorientador: Prof. Dr. Éder Carlos Moreira

ALEGRE, ES
FEVEREIRO, 2019

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

C532r Chicon, Marcello, 1992-
Resíduos finos da indústria de rochas ornamentais: os materiais depositados e os segregados / Marcello Chicon. - 2019. 57 f. : il.

Orientadora: Mirna Neves.

Coorientador: Éder Moreira.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias e Engenharias.

1. rochas ornamentais. 2. caracterização e classificação de resíduos. 3. passivo ambiental. I. Neves, Mirna. II. Moreira, Éder. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências Agrárias e Engenharias. IV. Título.

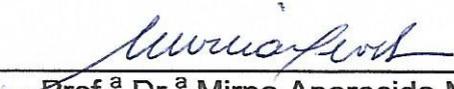
CDU: 66.0

Marcello Ciciliote Chicon

**RESÍDUOS FINOS DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS: OS
MATERIAIS DEPOSITADOS E OS SEGREGADOS**

Dissertação de mestrado apresentado ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Química do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Química.

Examinado em 26 de fevereiro de 2019.



Prof.^a Dr.^a Mirna Aparecida Neves
Universidade Federal do Espírito Santo



Prof. Dr. Éder Carlos Moreira
Universidade Federal do Espírito Santo



Prof. Dr. Demetrius Profeti
Universidade Federal do Espírito Santo



Prof. Dr. Diego Lang Burak
Universidade Federal do Espírito Santo

RESUMO

CHICON, Marcello. **Resíduos Finos da Indústria de Rochas Ornamentais: Os Materiais Depositados e os Segregados**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, ES. Orientador: Prof^a. Dr^a. Mirna Aparecida Neves. Coorientador: Prof. Dr. Éder Carlos Moreira.

O mercado de rochas ornamentais é extremamente importante para o país, principalmente para o estado do Espírito Santo, maior produtor nacional e responsável por grande parcela do faturamento das exportações de chapas de rochas brasileiras. Entretanto, esta prática pode provocar graves consequências ambientais devido ao descarte inadequado dos resíduos sólidos gerados, tornando-o um passivo ambiental para estas indústrias. Desse modo, uma opção seria o estudo e a caracterização destes resíduos de modo a conhecer suas características e propriedades, determinada principalmente por sua composição química. Por meio dessas informações, pode-se definir o destino final adequado ao resíduo em questão. O objetivo deste trabalho foi caracterizar e classificar os resíduos provenientes de quatro depósitos de lama abrasiva, localizados no interior de Cachoeiro de Itapemirim (ES), além de compará-los estatisticamente. Conjuntamente foram analisados e comparados os resultados obtidos sobre os resíduos coletados de forma específica, ou seja, resíduos segregados de acordo com os tipos litológicos. Com relação aos resultados, destaca-se a classificação dos resíduos depositados como Inertes, ou seja, resíduos que não tem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, não oferecendo riscos a população e ao meio ambiente. Quanto aos resíduos segregados, nota-se que a presença de seus constituintes não ocorre de forma homogênea e que a solubilização de seus elementos são influenciados por determinados insumos utilizados durante o beneficiamento das rochas.

Palavras-chave: caracterização, classificação de resíduos, passivo ambiental.

ABSTRACT

CHICON, Marcello. **Fine Wastes from Dimension Stone Industry: The Deposited and the Segregated Materials**. 2019. Dissertation (Master degree in Chemical Engineering) – Federal University of Espírito Santo, Alegre, ES. Adviser: Prof^a. Dr^a. Mirna Aparecida Neves. Co-adviser: Prof. Dr. Éder Carlos Moreira.

The market for dimension stones is extremely important for the country, mainly for the State of Espírito Santo, the main Brazilian producer and responsible for a large portion of the revenue from exports of Brazilian stone sheets. However, this practice can cause serious environmental consequences due to the improper disposal of the generated solid waste, making it an environmental liability of these industries. Therefore, an option would be the study and characterization of these wastes in order to know its characteristics and properties, determined mainly by its chemical composition. Through this information, the best suitable destination for the residue in question can be determined. This paper consists in characterize and classify the waste from four old deposits of abrasive sludge, located in Cachoeiro de Itapemirim (ES), besides comparing them statistically. In addition, the results obtained on the collected residues were analyzed and compared, that is, the segregated residues according to the lithological types. Regarding the results, the classification of wastes deposited as Inertes, that is, waste that does not have any of its solubilized constituents at concentrations higher than water potability standards, offering no risk to the population and the environment. As for the segregated residues it is noticed that the presence of its constituents does not occur homogeneously and that the solubilization of its elements are influenced by certain inputs used during the processing of the stones.

Keywords: characterization, classification of wastes, environmental liability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema representativo do processo de beneficiamento de rochas ornamentais	12
Figura 2 – Esquema representativo da classificação de resíduos sólidos, de acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004)	14
Figura 3 – Imagens ilustrando alguns dos depósitos de resíduos estudados. Eles estão (a) dispostos diretamente sobre o solo em locais abandonados, onde (b) já começaram a ser recobertos por vegetação	21
Figura 4 – Esquema da estratégia de coleta de resíduos nos depósitos estudados mostrando, (a) a localização dos furos de sondagem em planta e (b) em perfil, com 2 pontos de amostragem em cada furo	21
Figura 5 - Porcentagem média do tamanho de partículas dos resíduos de cada depósito estudado.....	29
Figura 6 - Porcentagem média do tamanho de partículas dos resíduos depositados.....	29
Figura 7 - Dados obtidos após ensaio estatístico dos compostos analisados por FRX	30
Figura 8 – Concentrações de elementos e substâncias presentes no extrato obtido por meio do procedimento para obtenção do extrato lixiviado de resíduos sólidos de acordo com a NBR 10005 (ABNT, 2004a).....	33
Figura 9 - Dados obtidos após ensaio estatístico sobre os parâmetros analisados pelo teste de lixiviação	35
Figura 10 - Concentrações de elementos e substâncias presentes no extrato obtido por meio do procedimento para obtenção do extrato solubilizado de resíduos sólidos, de acordo com a NBR 10006 (ABNT, 2004b)	36
Figura 11 - Dados obtidos após ensaio estatístico sobre os parâmetros analisados pelo teste de solubilização	38
Figura 12 - Porcentagem média do tamanho de partículas dos resíduos segregados	40

Figura 13 - Dados obtidos da solubilização de diferentes tipos litológicos, referentes a concentração (mg/L) de Sódio, Potássio, Cálcio e Magnésio respectivamente	42
Figura 14 – Dados obtidos da solubilização de diferentes tipos litológicos, representados de acordo com sua variabilidade	43
Figura 15 – Gráficos de relação entre a composição química e a concentração dos elementos obtidos por solubilização. A Figura 14 (a), (b), (c) e (d) se referem respectivamente a concentração de Sódio (Na), Potássio (K), Cálcio (Ca) e Magnésio (Mg)	44

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
2	OBJETIVOS	9
3	PESQUISA BIBLIOGRÁFICA	10
3.1	Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS)	10
3.2	Geração de resíduos no beneficiamento de rochas ornamentais	11
3.3	Classificação de resíduos sólidos	13
3.4	Composição e classificação dos resíduos de rochas ornamentais	14
3.5	Impactos ambientais relacionados aos resíduos finos de rochas ornamentais	15
3.6	Possibilidades de utilização sustentável dos resíduos	17
3.6.1	Uso agrícola	17
3.6.2	Uso na construção civil	18
3.6.3	Uso na produção de cosméticos	19
3.6.4	Uso na fabricação de vidros	20
4	MATERIAIS E MÉTODOS	21
4.1	Coleta de Amostras	21
4.1.1	Coleta dos resíduos depositados	21
4.1.2	Coleta dos resíduos segregados por tipo litológico	22
4.2	Análise Granulométrica	23
4.3	Análise Química	24
4.4	Teste de Lixiviação	24
4.5	Teste de Solubilização	26
4.6	Determinação da perda ao fogo	26
4.7	Tratamento Estatístico dos dados	27
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
5.1	Resíduos depositados em aterros	28
5.1.1	Granulometria dos resíduos depositados	28
5.1.2	Composição química dos resíduos depositados	30
5.1.3	Classificação dos resíduos depositados	34
5.2	Resíduos segregados por tipo litológico	40
5.2.1	Granulometria dos resíduos segregados	40
5.2.2	Composição química dos resíduos segregados	41
5.2.3	Solubilização de elementos dos resíduos segregados	42
5.3	Possíveis utilizações dos resíduos estudados como matéria prima	47
5.3.1	Tijolos maciços	47

5.3.2	Concreto	47
5.3.3	Vidro sodo-cálcico.....	48
5.3.4	Correção da acidez do solo e enriquecimento mineral	48
6	CONCLUSÕES	50
7	REFERÊNCIAS.....	51

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento dos processos integrados à cadeia produtiva do setor de rochas ornamentais é de certa forma recente no Brasil, uma vez que as atividades de extração de rochas foram iniciadas por volta de 1940, o beneficiamento industrial na década de 1970 e as exportações somente na década de 1990 (LEITE; FUJACO, 2013).

A indústria de rochas ornamentais apresentou um notável crescimento nos últimos anos, isto devido às inúmeras formas de utilização do mármore e granito na construção civil, entre aplicações estéticas e decorativas. O Brasil se destaca mundialmente como um dos maiores produtores e exportadores destes tipos de rochas, exportando de janeiro a março do ano de 2018 um número superior a 420 mil toneladas (SINDIROCHAS, 2018).

Segundo o Sindirochas (2017), as exportações de rochas ornamentais no Brasil atingiram cerca de 2,3 milhões de toneladas e US\$ 1,1 bilhões em dezembro de 2017, com destaque para o Espírito Santo, que respondeu por 76% do volume físico e 81% do total do faturamento das exportações brasileiras.

A expansão do consumo de rochas ornamentais favorece de forma considerável o mercado interno brasileiro, por outro lado, causa significativo aumento de impactos ambientais, uma vez que o sistema produtivo gera significativa quantidade de resíduos (BRAGA et al., 2010). Para a produção de chapas polidas, os blocos de rochas passam por um processo de beneficiamento após sua extração, produzindo resíduos em todas as etapas do processo.

De acordo com Vidal, Azevedo, Castro (2014), são produzidos no Brasil cerca de 1.500.000 toneladas de resíduos finos anualmente, compostos principalmente por pó de rocha, água, cal, abrasivos, lâminas e granalha desgastadas. Após as etapas de beneficiamento, a geração de resíduos chega a ser da ordem de 30 a 40% da matéria-prima utilizada.

Os resíduos que vêm sendo depositados a várias décadas, em locais geralmente improvisados e desprotegidos, constituem atualmente passivos ambientais da indústria de rochas ornamentais. Trabalhos anteriores (RAYMUNDO et al., 2013; BILDHAUER et al., 2015; SOUZA et al., 2010) estudaram a constituição e aplicabilidade da lama abrasiva tal qual ela é gerada, mas os materiais depositados de forma aleatória e expostos às intempéries ainda não foram estudados. Além do estudo dos potenciais impactos que esses resíduos podem representar ao meio

ambiente nas condições atuais, o conhecimento de sua variabilidade composicional é fator importante para verificar as possibilidades de seu uso em outros setores produtivos, desde que se possa garantir, até certo ponto, a previsibilidade de suas características composicionais.

Desse modo, este trabalho prevê o estudo de resíduos coletados em quatro depósitos antigos de lama abrasiva, objetivando classificá-los e caracterizá-los com vistas ao estudo do potencial de impactos ambientais e das possibilidades de uso, buscando uma solução eficaz do principal passivo ambiental da indústria de rochas ornamentais.

Paralelamente, foram estudados os resíduos gerados individualmente por tipos litológicos distintos, buscando compará-los e verificar se a triagem e segregação seriam métodos viáveis para possibilitar o uso dos resíduos.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho foi caracterizar os resíduos finos gerados no beneficiamento de rochas ornamentais com vistas ao estudo do potencial de impactos e das possibilidades de uso desses materiais. Para isso, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Caracterização física e química dos resíduos;
- Classificação dos resíduos segundo a norma NBR 10004 (ABNT, 2004);
- Comparação entre os atributos dos depósitos buscando identificar diferenças ou semelhanças entre eles.
- Análise e comparação dos resultados obtidos sobre os resíduos segregados de acordo com os tipos litológicos específicos.

3 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

3.1 Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS)

A Política Nacional de Resíduos Sólidos do Brasil (PNRS) tem o intuito de realizar a gestão integrada e o gerenciamento dos resíduos sólidos. Atualmente, a PNRS é instituída conforme a Lei nº 12.305/10, a qual constitui um importante instrumento frente ao inadequado manejo dos resíduos sólidos realizados no país, causando problemas ambientais, sociais e econômicos. Essa política tem como proposta a prática de hábitos de consumo sustentável, além de prover de meios para propiciar o aumento da reciclagem e da reutilização dos resíduos sólidos, assim como a destinação ambientalmente adequada dos rejeitos. Segundo a PNRS, resíduo sólido é aquilo que tem valor econômico e pode ser reciclado ou reaproveitado, enquanto o rejeito é aquilo que não pode ser reciclado ou reutilizado (BRASIL, 2017).

A PNRS incorpora conceitos modernos da gestão de resíduos sólidos, trazendo novos métodos à legislação ambiental brasileira. Dentre esses aspectos está o acordo setorial, um contrato firmado entre o poder público e o meio empresarial, visando à implantação da responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida do produto, buscando a minimização do volume de resíduos sólidos e rejeitos gerados. Destaca-se também a logística reversa, instrumento de desenvolvimento econômico e social, descrito por um conjunto de ações e procedimentos destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial para reaproveitamento em seu ciclo produtivo ou outra destinação final ambientalmente adequada. Atualmente, alguns setores brasileiros vêm implementando este processo, como é o caso das pilhas e baterias, pneus, embalagens e resíduos de óleos lubrificantes, descarte de medicamentos e embalagens em geral (MARCHI, 2011). E por fim, o Plano Nacional de Resíduos Sólidos a ser elaborado com ampla participação social, contendo metas e estratégias nacionais sobre o tema, onde também estão previstos planos estaduais, microrregionais entre outros (BRASIL, 2017).

Os pontos mencionados são de suma importância, uma vez que formam um complexo favorável ao meio ambiente. Através da PNRS busca-se um maior cuidado com o ambiente no qual estamos inseridos, assim como na correção de práticas prejudiciais, como é o caso dos lixões e outras formas de acondicionamento a céu aberto, já que são considerados como crime ambiental nos últimos anos.

3.2 Geração de resíduos no beneficiamento de rochas ornamentais

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, nos termos da NBR 15.012 (ABNT, 2003), define-se rocha ornamental como: material rochoso natural, submetido a diferentes graus ou tipos de beneficiamento, utilizado para exercer uma função estética.

A produção das rochas ornamentais envolve os processos de extração e beneficiamento. A extração consiste na remoção da matéria-prima, ou seja, a retirada de blocos das pedreiras com dimensões que proporcionem o melhor aproveitamento do material. A etapa seguinte, o beneficiamento, visa basicamente à transformação dos blocos extraídos em produtos semiacabados ou chapas prontas, podendo ser separados em beneficiamento primário e secundário (ALENCAR, 2013; VIDAL, AZEVEDO, CASTRO, 2014).

O beneficiamento primário, também conhecido como desdobramento, compreende a preparação e serragem dos blocos em chapas de espessura variável, usualmente dois ou três centímetros, através de equipamentos como teares multilâminas (convencionais), que utilizam lâminas de aço, ou teares multifios, que utilizam fios diamantados para a serragem dos blocos. O tear multifio apresenta maior eficiência quando comparado ao convencional, pois além de processar o corte de forma mais rápida, gera um resíduo mais limpo, facilitando seu descarte e possível uso. Enquanto o resíduo produzido no multifio é constituído basicamente de pó de rocha e água, no tear convencional agrega-se o ferro, devido ao desgaste da lâmina e granalhas de aço em atrito com a rocha, e a cal, adicionada para dar consistência à polpa de serragem (ALENCAR, 2013).

No segundo processo, o beneficiamento secundário, as chapas são submetidas ao acabamento superficial, com ou sem resinagem, que pode ser um simples desbaste, polimento, entre outros. Dentre estes, o processo de polimento das chapas brutas configura-se como a etapa mais importante, devido aos vários procedimentos que reduzem a rugosidade da superfície transformando-a em uma placa com brilho (VIDAL, AZEVEDO, CASTRO, 2014).

Ao final do processo estima-se que 30 a 40% do material rochoso extraído seja descartado, formado de resíduo muito fino misturado com os insumos da serragem e de resíduo grosso, na forma de casqueiro (restos da porção superficial dos blocos). Estima-se, então, que no beneficiamento sejam geradas em torno de 1.500.000 toneladas de resíduos finos (pó de rocha) e quase 1.000.000 toneladas de resíduos

grossos (casqueiros e aparas) anualmente no país (VIDAL, AZEVEDO, CASTRO, 2014). A Figura 1 apresenta, de forma resumida, o processo de beneficiamento de rochas ornamentais.

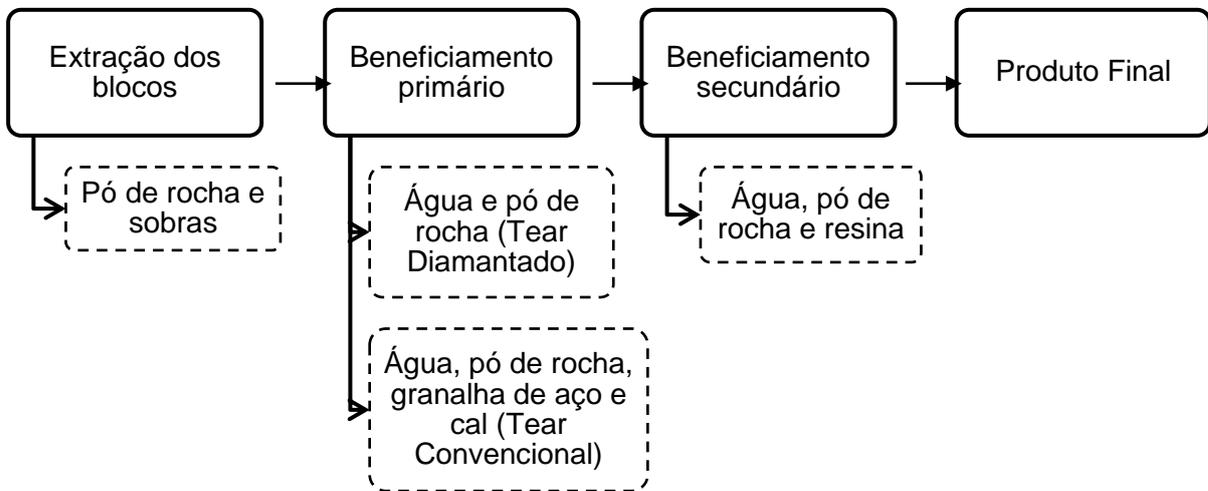


Figura 1 – Esquema representativo do processo de beneficiamento de rochas ornamentais.

Há alguns anos, muitas empresas de beneficiamento de rochas ornamentais, devido à escassa fiscalização, descartavam seus resíduos em aterros clandestinos, sem nenhum preparo ou monitoramento do local. Atualmente, esta prática não é mais tolerada, uma vez que estas empresas estão sujeitas a vistorias periódicas e multas pesadas no caso de alguma infração. Hoje em dia, à grande maioria das indústrias optam por contratar um serviço terceirizado quanto ao descarte do resíduo. A empresa então remove quase toda água presente no resíduo, seja através de um filtro prensa ou lagoa de decantação, reaproveitando a água residuária no processo de beneficiamento. O resíduo, caso apresente menos de 30% de umidade, é então transportado para um aterro industrial controlado.

Segundo a Instrução Normativa nº 11 do IEMA (ESPÍRITO SANTO, 2016), o local selecionado para a implantação do aterro de lama do beneficiamento de rochas ornamentais deve ser tal que o impacto ambiental seja minimizado e esteja de acordo com o zoneamento da região. De acordo com a norma, alguns critérios devem ser seguidos, como: sua localização deve estar em consonância com a legislação local de uso e ocupação do solo; deve respeitar a faixa de domínio de rodovias, ferrovias, linhas de transmissão, entre outros; recomenda-se uma distância superior a 300 metros da área útil do aterro a núcleos populacionais; o terreno deve apresentar declividade superior a 1% e inferior a 45%, não podendo ser executado

em áreas sujeitas a inundação; a distância da cota de fundo do aterro até o lençol freático deve ser obrigatoriamente igual ou superior a 3 metros; não poderá ser construído em Área de Preservação Permanente ou Reserva Legal, e por fim, o aterro deve estar localizado a uma distância mínima de 200 metros de qualquer coleção hídrica ou curso d'água e nunca inferior a 100 metros de nascentes.

3.3 Classificação de resíduos sólidos

De acordo com a norma NBR 10004 (ABNT, 2004), a classificação de resíduos necessita do conhecimento do processo ou atividade que lhes deu origem e de seus constituintes e características, de modo a compará-los com outros resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido.

Para tanto, utiliza-se os procedimentos de obtenção do extrato líquido lixiviado e solubilizado, descritos nas normas NBR 10005 e 10006 (ABNT, 2004a; ABNT 2004b) respectivamente. O extrato lixiviado de resíduos sólidos, visa a diferenciar os resíduos classificados pela ABNT NBR 10004 como Classe I – Perigosos - e Classe II – Não Perigosos, enquanto o extrato solubilizado diferencia o resíduo Não Perigoso em Não Inerte (Classe II-A) e Inerte (Classe II-B). Obtidos os extratos, estes são então analisados por métodos específicos de acordo com a substância ou elemento a ser mensurado.

Desta forma, os resíduos podem ser classificados como:

- Classe I - Resíduos Perigosos: São aqueles que exibem características que apresentam riscos a população e ao meio ambiente, como: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade. Sendo enquadrados na categoria de contaminantes e tóxicos, necessitando de tratamentos especiais.
- Classe II A – Não Inertes: Estes resíduos não apresentam as características dos resíduos perigosos, porém, podem apresentar riscos ao ser humano e ao meio ambiente. Como não são inertes, apresentam propriedades como: combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água, sendo enquadrados como possíveis contaminantes, também necessitando de um tratamento adequado.

- Classe II B - Inertes: Resíduos que não tem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, não oferecendo riscos a população e ao meio ambiente.

A classificação dos resíduos sólidos pode ser representada de acordo com a Figura 2.

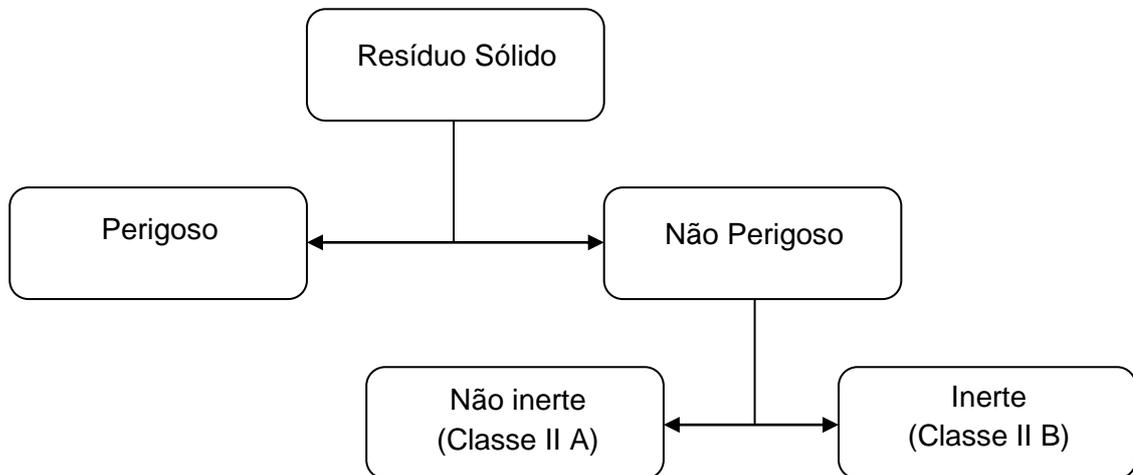


Figura 2 – Esquema representativo da classificação de resíduos sólidos, de acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004).

3.4 Composição e classificação dos resíduos de rochas ornamentais

Manhães e Holanda (2008) caracterizaram os resíduos de rochas graníticas coletados em uma empresa instalada no município de Santo Antônio de Pádua, no norte do Estado do Rio de Janeiro. Os resultados obtidos através do ensaio de lixiviação indicaram a presença de alguns metais, como: Arsênio, Chumbo, Cádmiio, entre outros em concentrações abaixo dos valores máximos estabelecidos no anexo F da norma NBR – 10004 (ABNT, 2004). Desse modo, descarta-se a classificação do resíduo granítico analisado como sendo Classe I - Perigoso. Analisando-se os dados obtidos pelo teste de solubilização, os resultados mostraram valores acima do limite estabelecido pelo anexo G da norma NBR – 10004 para o Chumbo, Cromo, Ferro e Manganês. Portanto, segundo os autores, o resíduo de rocha ornamental estudado pode ser classificado como um resíduo de Classe II A - Não Inerte.

Segundo o estudo dirigido por Souza et al. (2010), os resíduos de rochas ornamentais liberaram, no teste de solubilização, um excesso de Ferro e Alumínio, sendo assim, classificados como Não Inerte (Classe II A), segundo a NBR 10004. Os autores identificaram por difratometria de raios-x, picos de calcita e hematita,

ambos provenientes da utilização de abrasivos e objetos metálicos respectivamente, durante o beneficiamento da rocha.

Braga et al. (2010) caracterizaram os resíduos de rochas ornamentais gerados por algumas empresas de beneficiamento localizadas em Cachoeiro de Itapemirim, no sul do Estado do Espírito Santo, durante as etapas de corte e polimento separadamente. As amostras analisadas não apresentaram periculosidade, porém alguns parâmetros ultrapassaram os limites máximos permitidos na norma NBR 10004 (ABNT, 2004) para extratos solubilizados, sendo classificados então como Não Inertes (Classe II A). Ambos os resíduos, provenientes do corte e do polimento da rocha, apresentaram um valor elevado de pH, próximos aos limites superiores para corrosividade, segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004), indicando a necessidade de alguns cuidados especiais na manipulação destes resíduos.

De acordo com Freitas et al. (2012), resíduos provenientes da serragem de granitos e de mármore apresentam um pH elevado devido à inserção de cal no processo de corte dos blocos. Segundo os autores, o resíduo de corte de mármore é menos agressivo do que o de granitos comerciais devido ao menor teor de cal e granalha utilizados na serragem. Neste trabalho, os autores classificam tais resíduos como perigosos, pelo fato de ambos apresentarem caráter corrosivo/cáustico.

Neves et al. (2012) analisaram cinco depósitos de resíduos de rochas ornamentais de diferentes períodos de tempo e condições de armazenamento. Assim como alguns trabalhos já mencionados, os resíduos em questão foram classificados como Não Inertes (Classe II A), já que alguns metais excedem os limites permitidos pela NBR 10004. Entre eles, o Alumínio, presente acima do permitido nos cinco depósitos analisados, o Ferro, presente em quatro depósitos e o Chumbo e Manganês presente em dois. Quanto ao pH, as análises indicaram resultados diferentes do que foi visto por Braga et al. (2010) e Freitas et al. (2012), uma vez que, apresentou menor variabilidade de valores entre os depósitos, sempre ficando abaixo da faixa de resíduos corrosivos.

3.5 Impactos ambientais relacionados aos resíduos finos de rochas ornamentais

A indústria de beneficiamento de rochas ornamentais tem sido citada pelos ambientalistas como fonte de contaminação e/ou poluição ao meio ambiente. Isso devido ao grande volume de resíduos gerados que muitas vezes são lançados

diretamente nos ecossistemas, sem um processo de tratamento para eliminar ou reduzir alguns constituintes presentes (LOUDES et al., 2012).

Em alguns casos, as empresas lançam seus resíduos na forma semissólida (lama fluida) em locais inadequados, por exemplo, em tanques de acúmulo em contato direto com o solo, sem a devida impermeabilização. A fração líquida presente no resíduo é então eliminada através da evaporação e infiltração no solo. Segundo constatou Prezotti (2003), à grande maioria das empresas de beneficiamento operam dessa forma.

Dentre os principais impactos causados, Leite e Fujaco (2013) destacam o aumento da carga de sedimentos em suspensão e turbidez dos afluxos utilizados como descarte de resíduos finos, contribuindo com o assoreamento dos cursos d'água. Além disso, assim como geralmente ocorre em uma atividade mineradora, há o risco de contaminação de recursos naturais por metais pesados, provenientes do processo de serragem das rochas (ARAUJO et al., 2014).

Segundo Freitas et al. (2012), a presença de grande quantidade de cal nestes resíduos aumenta o pH do material que, se descartado incorretamente, poderá alterar as condições naturais do ambiente em contato.

Rocha e Sousa (2010) realizaram uma análise ambiental do processo de extração e beneficiamento de rochas ornamentais. Os autores listam logo de início os impactos e possíveis interferências ambientais no processo de extração, entre eles, alteração estético-visual, aumento da capacidade erosiva, supressão da vegetação e de habitats. Em relação às etapas de beneficiamento, os autores destacam os riscos pertinentes ao descarte inadequado da lama abrasiva formada durante o corte da rocha, assim como a poluição atmosférica provocada pelas partículas suspensas.

Aguiar et al. (2016) avaliaram o potencial mutagênico dos resíduos de polimento, processo onde são utilizadas resinas e abrasivos. O estudo consistiu em analisar e comparar células de peixes e de cebolas germinadas na presença destes resíduos por um determinado período de tempo. De acordo com os autores, tanto as sementes quanto os peixes expostos ao resíduo apresentaram algumas aberrações cromossômicas, concluindo-se que o resíduo analisado apresenta um potencial mutagênico nas condições estudadas. Segundo os autores, este efeito pode estar relacionado com o elevado teor de compostos fenólicos identificados nas amostras, que foram coletadas diretamente do tanque de decantação do efluente de polimento das chapas.

3.6 Possibilidades de utilização sustentável dos resíduos

3.6.1 *Uso agrícola*

Cola e Simão (2012) investigaram a utilização do pó de rocha como fertilizante na agricultura. Essa técnica, conhecida como rochagem, é considerada uma alternativa no fornecimento de nutrientes para o solo. Segundo os autores, o uso de uma mistura de resíduos provenientes de diferentes tipos de rochas e de um fertilizante convencional não diferiram na produtividade e no peso médio dos frutos testados. Os resíduos de rochas utilizados apresentaram algumas vantagens, como correção do pH e fornecimento de nutrientes. Porém, a liberação de nutrientes ocorre de forma lenta devido à morosa solubilização dos minerais presentes nas rochas, dificultando a disponibilização dos nutrientes para as plantas. De acordo com os autores, estes processos ainda estão sob estudos, mas devido à grande variabilidade composicional das rochas e resíduos gerados, é válida a investigação para cada tipo litológico.

Raymundo et al. (2013) compararam resíduos de mármore serrados em tear diamantado e convencional e um calcário comercial quanto à capacidade de neutralização de acidez do solo. Ambos os resíduos e o calcário comercial elevaram as concentrações de Cálcio (Ca) e Magnésio (Mg), assim como o pH do solo, eliminando a toxicidade de Alumínio (Al). Portanto, todos os insumos testados e analisados podem ser utilizados como corretivo de acidez de solos, devido às reatividades apresentadas.

Assim como o mármore, resíduos provenientes da serragem de rochas graníticas também foram testados como corretivo e fertilizante de solos agrícolas. Da Costa et al. (2010) avaliaram o potencial para uso agrícola dos resíduos de corte do granito analisando alguns parâmetros, entre eles, a granulometria dos materiais, teores de Ferro e nutrientes (Nitrogênio, Fósforo, Cálcio, Magnésio e Zinco). Realizadas as análises, constatou-se como principal empecilho à sua utilização agrícola o fato das amostras apresentarem elevadas quantidades de Ferro proveniente do desgaste das granelhas de aço utilizadas durante a serragem do bloco. O alto nível de Ferro pode limitar seu uso no solo, uma vez que concentrações muito elevadas deste elemento podem ser tóxicas para plantas, comprometendo a absorção de outros nutrientes. Segundo Jucoski et al. (2016), o Ferro, embora micronutriente essencial, quando em

excesso pode causar redução no crescimento e, conseqüentemente, na produtividade das plantas.

3.6.2 Uso na construção civil

Através do estudo da composição do resíduo gerado por uma empresa espanhola de beneficiamento de rochas, Barrientos et al. (2010) estimaram a porcentagem dos componentes presentes e propuseram uma aplicação para o resíduo em questão. Após a filtragem dos resíduos e separação do pó de rocha, foram caracterizadas amostras provenientes da serragem de granito, incluindo a determinação de sua mineralogia, composição química e propriedades físicas. Os autores concluíram que o pó de granito apresenta baixa permeabilidade quando bem compactados e dependendo do estado de compactação podem ser utilizados como revestimentos na construção civil.

Assim como Barrientos et al. (2010), Menezes et al. (2005) conduziram uma pesquisa destinada à produção de peças cerâmicas utilizando o pó proveniente da serragem de rochas graníticas como base do processo. Os resíduos utilizados como matéria-prima foram caracterizados e analisados de acordo com a sua viabilidade de utilização. Através da caracterização, as amostras apresentaram em sua composição basicamente quartzo, feldspato e mica, assim como uma elevada porcentagem de Sílica (SiO_2), propriedade importante para confecção das peças cerâmicas por modificar a plasticidade e facilitar a etapa de secagem da argila. Comprovados os componentes presentes nas amostras, e comparando-se a densidade, tamanho e área superficial das partículas com as matérias-primas de cerâmicas convencionais, observou-se uma semelhança entre os insumos. Segundo o autor, a adição destes resíduos em composições cerâmicas para a produção de tijolos causou um aumento na absorção de água e conseqüentemente diminuiu o módulo de ruptura do material, inviabilizando o processo. Já no caso da produção de azulejos, as amostras de resíduos testadas se mostraram eficientes quando misturadas as composições cerâmicas usualmente empregadas, tornando-se possível a utilização destes na construção civil.

Seguindo na mesma área de utilização, Bildhauer et al. (2015) avaliaram o potencial do uso de resíduos de mármore e granito na cerâmica vermelha, objetivando a confecção de tijolos maciços. Após misturar diferentes frações do resíduo à massa argilosa e obter os resultados dos testes realizados quanto a resistência à

compressão, absorção de água, entre outros, concluiu-se que se pode adicionar até 20% do resíduo à massa cerâmica. Além de não prejudicar o produto final, constatou-se que esta incorporação do resíduo de mármore e granito contribuiu para o desenvolvimento de um produto melhor e mais competitivo no mercado, devido às suas características refratárias.

Gonçalves (2000) e Almeida et al. (2007) desenvolveram concretos a partir da introdução de resíduo de rocha ornamental na massa de cimento. No primeiro trabalho, a mistura do resíduo ocorreu em diferentes frações, sendo incorporado à massa de cimento, de 10 a 20% em massa do resíduo. Foram avaliadas as propriedades do concreto endurecido, como resistência à tração, compressão e parâmetros de durabilidade. Segundo o autor, após a realização dos testes, concluiu-se que a utilização do resíduo como adição em concretos é viável tecnicamente, e que 10% de adição apresentou o melhor desempenho. Almeida et al. (2007) concluíram que 5% do resíduo incorporado ao concreto apresentou melhor resistência à tração e compressão. De acordo com os autores é viável a incorporação de até 20% em massa do resíduo sem que prejudique as propriedades mecânicas do concreto.

Além dos trabalhos citados anteriormente ressalta-se a importância das indústrias em promover a adoção de práticas sustentáveis. Como exemplo, pode-se citar a Associação Ambiental Monte Líbano (AAMOL), um centro de tratamento dos resíduos gerados no processo produtivo de rochas ornamentais, que busca transformá-los em subprodutos e possibilita, assim, o reaproveitamento em outros setores produtivos. Atualmente, a AAMOL se concentra na produção de diversos tipos de britas, muito utilizadas na construção civil, a partir dos casqueiros reaproveitados.

3.6.3 Uso na produção de cosméticos

Além de estudos referentes à utilização dos resíduos na construção civil, Oliveira, Queiroz e Ribeiro (2009) estudaram a viabilidade da aplicação dos resíduos de corte das rochas ornamentais na produção de cosméticos. Os autores caracterizaram o resíduo segundo ensaios para determinação de sua composição química e mineralógica, por meio de FRX e DRX, respectivamente. Os resíduos foram adicionados na produção de sabonetes, variando-se a taxa de 5 a 70%, de acordo com as normas de fabricação para este tipo de produto. Os sabonetes foram

testados quanto às propriedades de densidade, absorção de água, porosidade, rachaduras e desgaste, sendo testados também na pele de coelhos. Segundo os autores, o melhor teor de resíduo acrescentado foi de 40%, apresentando as características dos sabonetes convencionais e não causando irritação na pele das cobaias.

3.6.4 Uso na fabricação de vidros

Babisk (2009) desenvolveu vidros do tipo sodo-cálcicos através do aproveitamento de resíduos de rochas ornamentais silicáticas e carbonáticas. De acordo com os resultados obtidos através das análises de caracterização, estes apresentaram similaridades com outros resultados encontrados na literatura quanto às propriedades químicas e físicas. Os vidros produzidos apresentaram propriedades semelhantes aos encontrados no mercado e, segundo o autor, pode ser utilizado em janelas devido à resistência hidrolítica apresentada.

Souza et al. (2010) promoveram um estudo envolvendo a fabricação de alguns produtos vitrocerâmicos (telhas, azulejos, entre outros) utilizando os resíduos de rochas ornamentais. De acordo com os testes de fabricação das peças vitrocerâmicas, comprovou-se que os materiais podiam ser produzidos contendo até 47,5% em peso de resíduo, estando de acordo com os padrões brasileiros e apresentando bons resultados nos testes realizados, principalmente na diminuição da absorção de água e aumento da densidade do material fabricado. Segundo os autores, a utilização destes resíduos na fabricação de materiais vitrificados pode ser um solução tecnológica, com inúmeras vantagens econômicas e benefícios.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Coleta de Amostras

4.1.1 Coleta dos resíduos depositados

Os resíduos foram coletados em depósitos antigos de lama abrasiva, situados no município de Cachoeiro de Itapemirim, sul do estado do Espírito Santo (Figura 3). A coleta foi realizada em 2010 e o material ficou acondicionado no laboratório de hidrogeologia localizado na Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) para posterior estudo. Para a sondagem do terreno, utilizaram-se trados manuais e mecânico de modo a coletar amostras do resíduo em profundidade. Em cada um dos quatro depósitos estudados, foram perfurados três furos de sondagem em locais estratégicos, de modo a representar da melhor forma cada um dos depósitos. Em cada furo coletou-se amostras a um e dois metros de profundidade (Figura 4), garantindo-se certa representatividade dos locais estudados. Desse modo, contabilizaram-se duas amostras por furo e seis por depósito, totalizando 24 amostras ao final da coleta.



Figura 3 – Imagens ilustrando alguns dos depósitos de resíduos estudados. Eles estão (a) dispostos diretamente sobre o solo em locais abandonados, onde (b) já começaram a ser recobertos por vegetação. Foto: Mirna Neves.

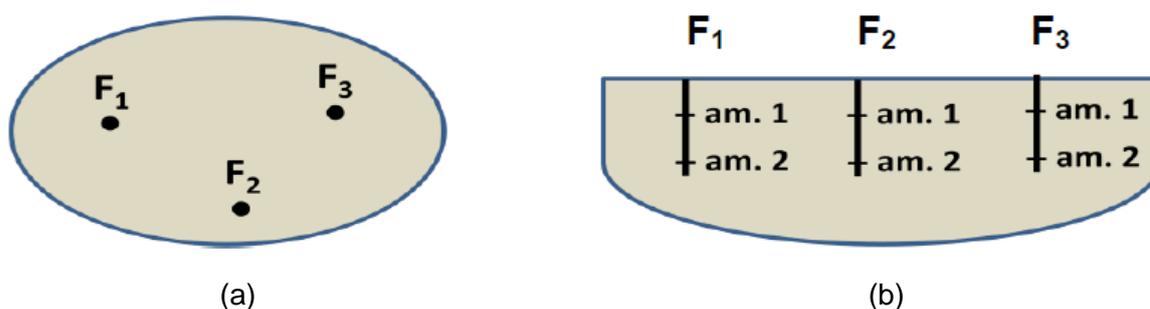


Figura 4 – Esquema da estratégia de coleta de resíduos nos depósitos estudados mostrando, (a) a localização dos furos de sondagem (F₁, F₂ e F₃) em planta e (b) em perfil, com dois pontos de amostragem em cada furo (am.1 e am.2).

O quadro a seguir se refere à codificação das amostras analisadas.

Quadro 1 - Codificação das amostras

Depósito (D)	Furo (F)	Profundidade (P)	Código
Depósito 1 (D1)	Furo 1 (F1)	1 metro	D1-F1-1m
		2 metros	D1-F1-2m
	Furo 2 (F2)	1 metro	D1-F2-1m
		2 metros	D1-F2-2m
	Furo 3 (F3)	1 metro	D1-F3-1m
		2 metros	D1-F3-2m
Depósito 2 (D2)	Furo 1 (F1)	1 metro	D2-F1-1m
		2 metros	D2-F1-2m
	Furo 2 (F2)	1 metro	D2-F2-1m
		2 metros	D2-F2-2m
	Furo 3 (F3)	1 metro	D2-F3-1m
		2 metros	D2-F3-2m
Depósito 3 (D3)	Furo 1 (F1)	1 metro	D3-F1-1m
		2 metros	D3-F1-2m
	Furo 2 (F2)	1 metro	D3-F2-1m
		2 metros	D3-F2-2m
	Furo 3 (F3)	1 metro	D3-F3-1m
		2 metros	D3-F3-2m
Depósito 4 (D4)	Furo 1 (F1)	1 metro	D4-F1-1m
		2 metros	D4-F1-2m
	Furo 2 (F2)	1 metro	D4-F2-1m
		2 metros	D4-F2-2m
	Furo 3 (F3)	1 metro	D4-F3-1m
		2 metros	D4-F3-2m

4.1.2 Coleta dos resíduos segregados por tipo litológico

A coleta dos resíduos separados por tipos litológicos distintos foi realizada na empresa de beneficiamento de rochas ornamentais Bramagran - Brasileiro Mármores e Granitos LTDA, localizada no município de Castelo, sul do estado do Espírito Santo. As amostras foram coletadas da saída do tear convencional e diamantado, de modo a evitar a mistura de resíduos de diferentes tipos de rochas, ao todo, foram coletados os resíduos de 11 tipos litológicos distintos (Tabela 1). As

amostras coletadas foram provenientes dos tipos de rochas beneficiadas durante o período de coleta, sem seleção dos tipos litológicos obtidos. Após a coleta, as amostras foram armazenadas em frascos de polietileno de 2 litros e acondicionada em um refrigerador, com temperatura de 4 °C no Laboratório de Hidrogeologia, pertencente ao Departamento de Geologia, localizado na Universidade Federal do Espírito Santo (UFES).

Tabela 1 – Legenda dos diferentes tipos de rochas analisadas

Siglas	Tipos Litológicos
PA	PRETO ARACRUZ
BF	BLUE FIRE
AS	AMARELO SAMOA
AI	AMARELO ICARAÍ
DC	DOURADO CARIOCA
PI	PRETO INDIANO
BD	BRANCO DALLAS
VP	VERDE PEROLA
MA	MÁRMORE AQUARELA
OI	OCRE ITABIRA
BC	BRANCO CEARÁ

4.2 Análise Granulométrica

A análise granulométrica foi realizada seguindo as normas da NBR 7217 (ABNT,1987) com algumas modificações e com o auxílio de um agitador mecânico de peneiras, no Laboratório de Engenharia Química - LEQ2, pertencente à Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Foram analisadas amostras compostas de cada depósito de acordo com sua profundidade de coleta, desse modo, obteve-se para cada depósito estudado (4 no total) duas amostras (para 1 e 2 metros), totalizando 8 amostras. Isso foi necessário para se obter a massa mínima exigida pela norma para a realização do ensaio. As peneiras de numeração 60 (0,25 mm), 115 (0,125 mm), 250 (0,063 mm) e 325 (0,045 mm) Mesh foram montadas no agitador de peneiras, nesta ordem, e o caixilho de fundo foi colocado na base do equipamento. O ensaio foi realizado a seco, motivo pelo qual formaram-se torrões de agregados de partículas finas que ficaram retidos na peneira de maior abertura.

Por isso, foi necessário macerar levemente o resíduo com pistilo de borracha para que os grumos formados fossem desfeitos, cuidando para que os grãos maiores não fossem fragmentados. O agitador foi ligado por cinco minutos e, após esse tempo, ainda havia pequenos grumos formados, então procedeu-se novamente uma leve maceração e nova agitação por mais cinco minutos. Ao final do processo, a parte retida em cada peneira, assim como a parte do fundo (caixilho) foi pesada na balança analítica de quatro dígitos e a massa de cada fração foi anotada para os cálculos de porcentagem.

O mesmo procedimento foi adotado para a separação granulométrica dos resíduos separados de acordo com os litotipos.

4.3 Análise Química

A análise química do resíduo coletado foi realizada por espectrometria de fluorescência de raios X (FRX) no Laboratório de Geoquímica do Departamento de Geologia do CCENS, pertencente à Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Esta técnica de emissão atômica permite identificar os elementos presentes em uma amostra através de uma análise qualitativa e quantitativa, estabelecendo-se sua concentração (BECKHOFF et al., 2007). Foram confeccionadas pastilhas prensadas para análise química por espectrometria de fluorescência de raio-x (FRX).

O material foi peneirado em uma peneira de mesh 115, obtendo-se 8 gramas de cada amostra. As amostras peneiradas foram misturadas e homogeneizadas com 1,6 gramas do ligante químico da Oregon Labware, colocando-os na matriz. Através de uma prensa hidráulica, prensou-se a mistura presente na matriz durante sete minutos. Decorrido esse tempo, desmontou-se o aparato, abriu-se a matriz e obteve-se a pastilha circular e homogênea para análise. Este procedimento foi realizado no Laboratório de Engenharia Química - LEQ2, localizado no prédio do REUNI, pertencente à Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Foram obtidas, assim, 24 pastilhas prensadas, referentes as 24 amostras de resíduo coletadas.

A análise química dos resíduos segregados por tipo litológico também foi realizada por espectrometria de fluorescência de raio-x (FRX), na Universidade Estadual Paulista - UNESP, seguindo o mesmo procedimento descrito para os resíduos depositados.

4.4 Teste de Lixiviação

O teste de lixiviação envolve a extração do extrato lixiviado, ou seja, um líquido extraído do resíduo por meio de procedimentos específicos. A análise da concentração de determinadas substâncias presentes no extrato permite diferenciar os resíduos sólidos e classificá-los de acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004).

De acordo com a norma NBR 10005 (ABNT, 2004a), define-se lixiviação de resíduos sólidos como sendo um processo para determinação da capacidade de transferência de substâncias orgânicas e inorgânicas presentes no resíduo sólido, por meio de dissolução em um meio extrator ácido. Obtido o extrato lixiviado, diferencia-se o resíduo classificado pela NBR 10004 como Classe I - Perigosos e Classe II - Não Perigosos.

O primeiro passo para a obtenção do extrato lixiviado é determinar a solução de extração a ser utilizada no processo, dessa forma, pesa-se 5 gramas do resíduo, transferindo-o para um béquer. Em seguida, adiciona-se 96,5 mL de água deionizada, agita-se a mistura formada durante 5 minutos, e mede-se o pH. Sendo o pH menor ou igual a 5, utiliza-se a solução de extração 1, composta por 5,7 mL de ácido acético glacial ultra puro, 64,3 mL de hidróxido de sódio (NaOH) 1,0 N e água deionizada, até completar 1 L de solução. Caso o pH seja maior que 5, adiciona-se 5 mL de ácido clorídrico (HCl) 1,0 N à solução e aquece à temperatura de 50°C durante um período de 10 minutos. Após a solução esfriar, mede-se o pH novamente, se o pH for menor ou igual a 5 utiliza-se a solução de extração 1, e no caso do pH ser maior que 5, utiliza-se a solução 2, composta por 5,7 mL de ácido acético glacial ultra puro e água deionizada até completar o volume de 1 L de solução.

O ensaio de lixiviação apresenta mais de um tipo de procedimento e pode ser aplicado para diferentes tipos de resíduos, entre eles, resíduos contendo teor de sólidos igual a 100%, resíduos com mais e menos de 0,5% de sólidos e lixiviação para voláteis.

Neste trabalho, realizou-se o teste de lixiviação para resíduos contendo teor de sólidos igual a 100%, e seu procedimento é descrito a seguir.

Inicialmente, pesou-se 100 gramas do resíduo e transferiu-se para o frasco de lixiviação, misturando-o com uma quantidade de solução de extração (1 ou 2) vinte vezes maior que a massa de resíduo utilizada. Vedou-se o frasco e com o auxílio de um agitador rotatório de frascos, agitou-se a mistura durante 18 horas a uma temperatura de no máximo 25°C com uma oscilação de 30 rpm, para garantir uma

agitação homogênea. Decorrido o tempo, filtrou-se a amostra, obtendo-se o extrato lixiviado.

Os testes de lixiviação das amostras coletadas nos quatro depósitos estudados foram realizados em laboratório particular (Centro Tecnológico de Análises - CETAN). Os extratos foram analisados por ICP-MS para a determinação das concentrações dos seguintes elementos e substâncias: Arsênio (As), Bário (Ba), Cádmio (Cd), Chumbo (Pb), Cromo (Cr), Fenol, Fluoreto (F-), Mercúrio (Hg), Prata (Ag) e Selênio (Se).

4.5 Teste de Solubilização

A análise do extrato solubilizado é feita para diferenciar um resíduo não perigoso como Classe II A - Não Inerte e Classe II B - Inerte.

De acordo com o procedimento da NBR 10006 (ABNT, 2004b), pesou-se 50 g do resíduo sólido seco em um béquer, posteriormente, adicionou-se 200 mL de água deionizada e misturou-se a solução formada com o auxílio de um bastão de vidro por 5 minutos. Decorrido esse tempo, o béquer foi vedado com filme plástico e deixado em repouso por sete dias, em temperatura ambiente controlada de 22 °C. Após o tempo em repouso, nota-se que o sólido decanta, então, filtrou-se a solução superficial, obtendo-se o extrato solubilizado. Por fim, analisaram-se os extratos através de espectrometria de absorção atômica no Laboratório de Solos do CCAE/UFES para as amostras de resíduos segregados e plasma por acoplamento indutivo (ICP-MS) no laboratório particular CETAN para os resíduos depositados.

Os extratos solubilizados obtidos a partir das 24 amostras coletadas nos 4 depósitos estudados, foram analisados com relação aos seguintes parâmetros: Alumínio (Al), Arsênio (As), Bário (Ba), Cádmio (Cd), Chumbo (Pb), Cloreto (Cl-), Cobre (Cu), Cromo (Cr), Fenol, Ferro (Fe), Fluoreto (F-), Manganês (Mn), Mercúrio (Hg), Prata (Ag), Selênio (Se), Sódio (Na), Sulfato (SO₄) e Zinco (Zn).

Os ensaios de solubilização para os resíduos de diferentes tipos litológicos foram feitos em triplicata. Para o tratamento dos dados, calculou-se a média aritmética das concentrações dos elementos analisados, Sódio (Na), Potássio (K), Cálcio (Ca) e Magnésio (Mg).

4.6 Determinação da perda ao fogo

Para a mensuração da perda ao fogo (PF) ou LOI (*Loss on Ignition* – Perda por Ignição), pesou-se 1 grama de cada uma das 24 amostras dos depósitos analisados, e então pesou-se os cadinhos e anotou-se as massas obtidas. Na sequência transferiu-se a massa de resíduo pesada anteriormente para os cadinhos, pesando-os novamente. As amostras foram colocadas na mufla onde ficaram por um período total de aproximadamente 7 horas. Esse período consistiu primeiramente no tempo de aquecimento, até atingir a temperatura desejada de 1000 °C, utilizando uma rampa de 5 °C/min, durando pouco mais de 3 horas. Atingida a temperatura, as amostras ficaram por mais 2 horas na mufla e, posteriormente, passaram por um período de resfriamento de aproximadamente 2 horas, até ser atingida a temperatura de 200 °C. Retiradas as amostras da mufla, pesou-se novamente os cadinhos, subtraindo-se o peso obtido da massa inicial, obtendo-se assim a perda do material que foi calcinado, que nesse tipo de material deve corresponder aos minerais carbonáticos presentes nas amostras. O processo de queima das amostras de resíduos foi realizado num forno elétrico tipo mufla, marca Flyever, modelo FortLab - 59/2013.

4.7 Tratamento Estatístico dos dados

Os parâmetros analisados nos testes de lixiviação e solubilização, assim como os compostos presentes na análise química (FRX) dos resíduos coletados nos depósitos estudados foram digitados e organizados em formas de tabelas no Excel. Utilizou-se o programa R Core Team (2017) para a realização do tratamento estatístico dos dados, comparando-se a média obtida de cada elemento ou composto de um determinado depósito com os demais, buscando identificar as diferenças e semelhanças entre eles. Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA), utilizando-se o teste F, com nível de confiança de 95%. Quando constatado que entre as médias dos 4 depósitos estudados havia diferença significativa, aplicou-se o teste de Tukey, com nível de confiança de 95%, de modo a descobrir quais médias eram semelhantes e quais eram diferentes.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Resíduos depositados em aterros

5.1.1 Granulometria dos resíduos depositados

De acordo com a distribuição granulométrica das amostras analisadas (Tabela 2), têm-se a quantidade em porcentagem da massa de partículas retidas nas seguintes peneiras: 60 (0,250 mm), 115 (0,125 mm), 250 (0,063 mm), 325 (0,045 mm) Mesh, e o caixilho no fundo, correspondente às frações menores que 0,045 mm.

Tabela 2: Granulometria das amostras de resíduo coletadas nos depósitos

PENEIRA (mesh)	# 60	# 115	# 250	# 325	caixilho
TAMANHO DA PARTÍCULA (mm)	0,25	0,125	0,063	0,045	< 0,045
D1-1m	0,8	7,0	20,0	45,2	27,0
D1-2m	0,6	4,2	24,0	10,0	61,2
D2-1m	4,0	10,5	28,5	27,0	30,0
D2-2m	1,5	7,0	24,5	30,0	37,0
D3-1m	2,6	6,8	21,4	31,0	38,2
D3-2m	3,0	6,3	32,7	28,4	29,6
D4-1m	3,6	10,8	33,3	25,0	27,3
D4-2m	3,0	4,0	55,0	18,0	20,0

OBS: Valores em % de partículas que ficaram retidas em cada peneira.

Os resíduos são compostos predominantemente por grãos de diâmetro menor que 0,063 mm, com porcentagens variando de 52,3 (D4-1m) a 72,2% (D1-1m), com exceção das amostras coletadas a dois metros de profundidade no depósito 4 (D4-2m), onde uma porcentagem menor de partículas (38%) apresentam diâmetros menores que 0,063 mm.

A Figura 5 representa a porcentagem média do tamanho de partículas das amostras de resíduos coletados em cada um dos 4 depósitos analisados de forma separada.

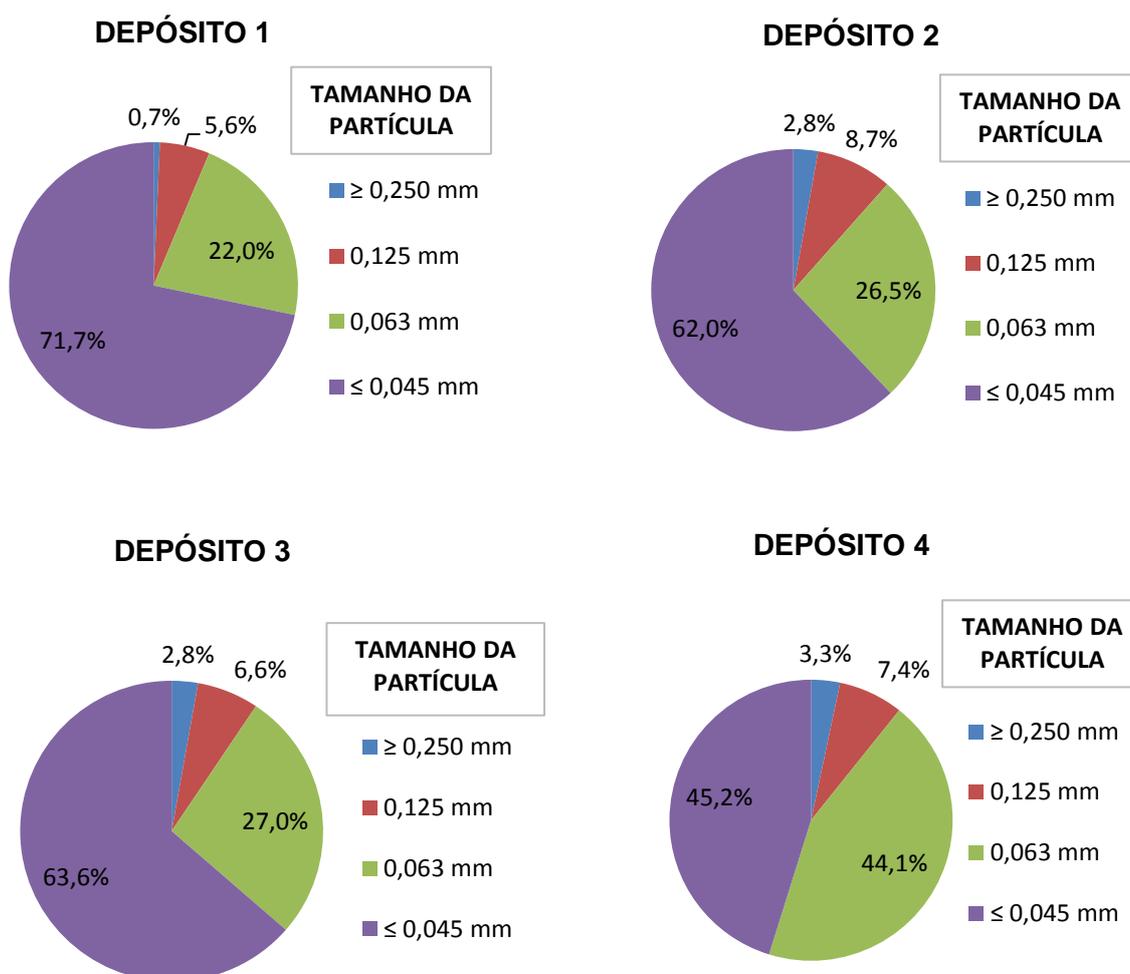


Figura 5 - Porcentagem média do tamanho de partículas dos resíduos de cada depósito estudado.

Analisando-se a granulometria de cada depósito separadamente, percebe-se que o primeiro (Depósito 1) apresentou uma granulação mais fina que os demais, onde as partículas menores ou iguais a 0,045 mm representam 71,7% da amostra. Os depósitos 2 e 3 apresentaram granulometrias bem próximas para aos tamanhos de partículas analisados, enquanto o depósito 4 apresentou a menor porcentagem referente as partículas de granulação menor ou igual a 0,045 mm (45,2%), obtendo-se assim a maior granulometria entre os depósitos.

A Figura 6 representa a porcentagem média do tamanho das partículas de resíduos coletados nos depósitos, obtida através da mistura das amostras referentes aos depósitos 1, 2, 3 e 4.

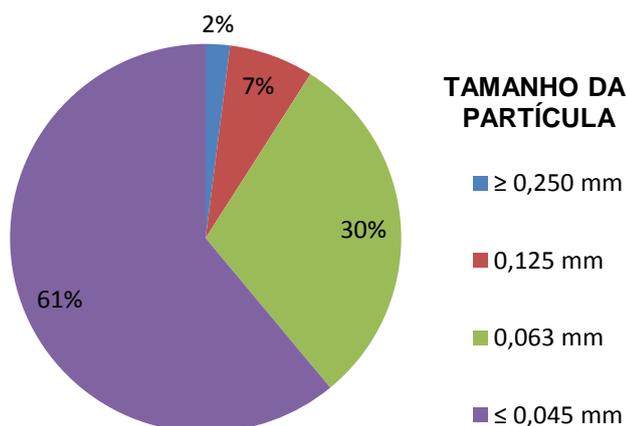


Figura 6: Porcentagem média do tamanho de partículas dos resíduos depositados.

De acordo com a Figura 6, a grande maioria das partículas presentes nos resíduos coletados nos depósitos são menores ou iguais a 0,045 mm, fato que já era esperado por se tratar de resíduos de granulação fina.

5.1.2 Composição química dos resíduos depositados

Os depósitos analisados possuem resíduos provenientes do beneficiamento de granito e mármore, que poderia ser confirmado através da presença de Silício (Si) e Cálcio (Ca), compostos predominantes em rochas silicáticas (granitos) e carbonáticas (mármore) respectivamente.

Os depósitos 1, 2 e 3 apresentam uma quantidade maior de rochas silicáticas, pelo fato de os resíduos possuírem maior quantidade de Si e menor de Ca. No depósito 4, verifica-se o inverso, pois em alguns pontos a presença do Ca supera bastante o Si. As quantidades de Alumínio (Al) apresentadas estão de acordo com o que se afirmou anteriormente, uma vez que este composto é o segundo mais presente no resíduo de granito, contendo valores próximos entre si nos três primeiros depósitos e uma quantidade bem inferior no depósito 4. Neste depósito, a ocorrência de mármore é maior, provavelmente pelo fato de estar localizado em uma região onde o beneficiamento de rochas carbonáticas superam as silicáticas. Além disso, apresenta uma ampla variação dos compostos analisados, provavelmente devido à presença de diferentes tipos de resíduos de rochas depositados.

De acordo com a análise química (FRX) das amostras dos resíduos depositados, obteve-se a composição química dos compostos representados pela Tabela 3.

Tabela 3 – Composição química dos resíduos coletados nos depósitos estudados

Amostras	Composição Química (%)								
	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	PF*
D1-F1-1m	48,06	16,82	12,29	5,91	6,39	4,69	2,48	0,71	1,60
D1-F1-2m	53,93	13,83	13,2	4,91	4,88	4,93	2,62	0,55	0,40
D1-F2-1m	54,09	13,38	13,05	5,28	4,96	5,02	2,53	0,59	0,30
D1-F2-2m	53,01	8,21	14,31	6,07	8,91	4,03	2,18	1,23	0,54
D1-F3-1m	36,86	21,38	10,07	10,04	13,6	3,39	1,89	0,86	0,39
D1-F3-2m	45,78	15,39	11,88	6,98	11,63	3,15	1,85	1,53	0,36
D2-F1-1m	66,77	3,99	13,43	6,35	1,01	5,13	2,64	0,23	0,06
D2-F1-2m	63,08	4,15	14,08	7,76	2,05	4,46	2,27	1,13	0,04
D2-F2-1m	61,07	3,94	14,56	8,93	1,38	5,25	2,77	0,96	0,04
D2-F2-2m	59,44	5,02	14,58	7,07	3,6	5,36	2,85	0,71	0,21
D2-F3-1m	65,88	2,57	13,18	8,93	1,08	5,09	2,2	0,56	0,03
D2-F3-2m	59,84	4,9	14,86	8,78	2,37	4,17	2,31	1,37	0,05
D3-F1-1m	61,03	5,44	13,42	9,11	1,11	5,09	2,99	0,69	0,07
D3-F1-2m	60,56	5,55	14,1	7,11	2,75	4,83	2,83	0,89	0,15
D3-F2-1m	59,27	7,11	13,95	7,75	2,24	4,71	3,05	0,85	0,23
D3-F2-2m	54,81	6,04	13,19	14,02	2,17	4,55	2,86	0,94	0,17
D3-F3-1m	60,35	6,05	14,01	7,33	1,61	4,81	3,01	0,97	0,49
D3-F3-2m	62,11	5,31	14,53	6,56	1,52	4,97	2,97	0,75	0,29
D4-F1-1m	31,61	42,2	6,78	2,36	12,15	2,12	1,11	0,43	0,70
D4-F1-2m	9,9	71,84	1,92	0,9	13,29	0,51	0,18	0,11	1,14
D4-F2-1m	23,01	52,25	5,46	2,2	13,34	1,39	0,69	0,33	0,85
D4-F2-2m	9,41	79,16	1,45	0,66	7,46	0,38	0,16	0,11	1,03
D4-F3-1m	53,67	13,42	11,1	3,76	10,35	4,07	1,9	0,57	0,33
D4-F3-2m	34,2	39,82	7,01	2,92	10,39	2,46	1,19	0,47	0,87

*PF = perda ao fogo.

A quantidade de Ferro (Fe) presente na maioria das amostras evidencia que a serragem dos blocos foi realizada pelo tear convencional, apresentando indícios de lâmina e granalha desgastada devido à presença do Fe, já que o mármore e o granito quase não apresentam este metal em sua estrutura. Uma possível explicação pelo menor teor de Fe no depósito 4 se dá pelo fato do mármore geralmente ser processado em tear diamantado sem o uso de granalha de aço, por ser menos resistente ao corte.

O Magnésio (Mg), presente majoritariamente no mármore, segue a relação já descrita, apresentando seus maiores valores onde a porcentagem do Ca também é alta.

Os demais compostos, Potássio (K), Sódio (Na) e Titânio (Ti), todos encontrados no granito, seguem a mesma tendência e apresentam maiores valores nos depósitos de maior ocorrência deste tipo de rocha, ou seja, nos depósitos 1, 2 e 3.

A Tabela 4 mostra a comparação dos compostos presentes na composição química das amostras depositadas através da análise de variância seguido dos testes F e Tukey. Estão representados os valores de cada parâmetro em porcentagem, obtidos através do cálculo da média das seis amostras coletadas em cada depósito (seis pontos por depósitos, $n = 6$), seguido pelo desvio-padrão referente.

Os dados representados na Tabela 4 também estão presentes graficamente na Figura 7.

Tabela 4 – Análise estatística das médias dos parâmetros obtidos para cada depósito, através da análise da composição química por FRX.

Depósitos	SiO₂	CaO	Al₂O₃
D1	48,62 ± 6,69 a	14,84 ± 4,34 b	12,47 ± 1,44 a
D2	62,68 ± 3,11 a	4,10 ± 0,88 b	14,12 ± 0,68 a
D3	59,69 ± 2,56 a	5,92 ± 0,66 b	13,87 ± 0,49 a
D4	26,97 ± 16,75 b	49,78 ± 23,81 a	5,62 ± 3,59 b

Depósitos	K₂O	Na₂O	TiO₂
D1	4,20 ± 0,80 a	2,26 ± 0,34 b	0,91 ± 0,39 a
D2	4,91 ± 0,48 a	2,51 ± 0,28 ab	0,83 ± 0,41 a
D3	4,83 ± 0,19 a	2,95 ± 0,09 a	0,85 ± 0,11 a
D4	1,82 ± 1,38 b	0,87 ± 0,67 c	0,34 ± 0,19 b

Depósitos	Fe₂O₃	MgO	PF
D1	6,53 ± 1,86 a	8,40 ± 3,63 a	0,60 ± 0,50 ab
D2	7,97 ± 1,09 a	1,92 ± 0,99 b	0,07 ± 0,07 c
D3	8,65 ± 2,77 a	1,90 ± 0,59 b	0,23 ± 0,15 bc
D4	2,13 ± 1,18 b	11,16 ± 2,25 a	0,82 ± 0,28 a

Médias com a mesma letra minúscula na coluna para um mesmo parâmetro não diferem entre si, pelo teste de Tukey (nível de confiança, 95%).

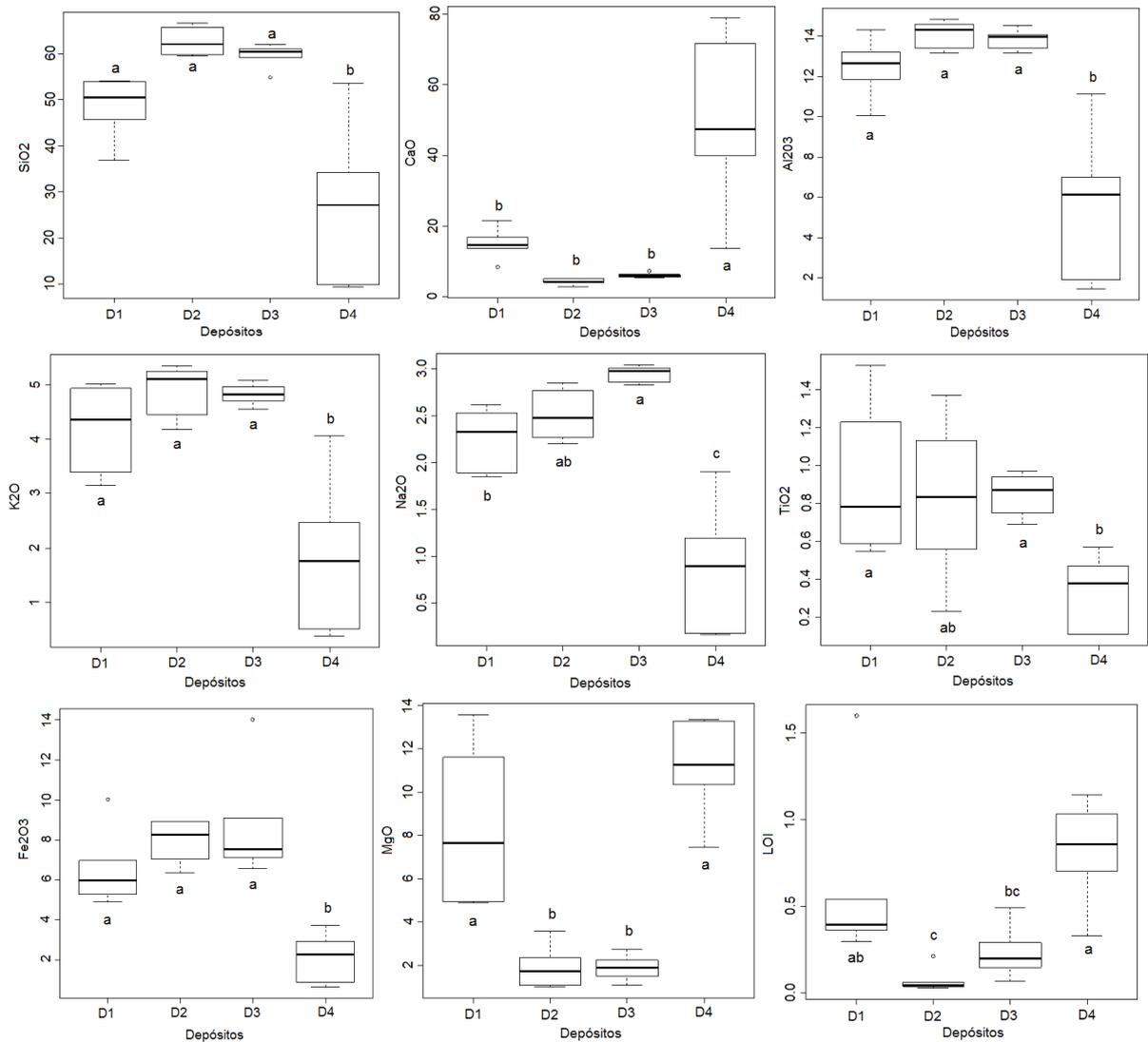


Figura 7 - Dados obtidos após ensaio estatístico dos compostos analisados por FRX, representando a variação dos dados observados por meio de quartis, valores em porcentagens (%).

Através da aplicação do teste estatístico sobre as amostras analisadas por FRX, conclui-se que os compostos referentes ao depósito 4 obtiveram as maiores discrepâncias de valores em relação as outras médias comparadas, pertencentes aos depósitos 1, 2 e 3. Isso, pelo fato destes depósitos apresentarem diferentes quantidades de resíduos provenientes de rochas silicáticas e carbonáticas depositadas, interferindo diretamente nas composições químicas analisadas.

Os compostos Si, Ca, Al, Fe e K, apresentaram as médias estatisticamente semelhantes para os depósitos 1, 2 e 3, diferindo apenas das médias do depósito 4. O Na obteve médias iguais entre os depósitos 1 e 2, assim como 2 e 3, enquanto o depósito 4 novamente apresentou médias diferentes das demais. O Mg apresentou

médias semelhantes para os depósitos 1 e 4, e 2 e 3, enquanto o Ti apresentou médias semelhantes para os depósitos 1, 2 e 3, sendo o depósito 2 também igual ao de número 4.

Em relação à perda ao fogo (LOI), as semelhanças entre as médias se deram através dos depósitos 1 e 3, 1 e 4, e 2 e 3.

5.1.3 Classificação dos resíduos depositados

Através dos resultados obtidos nos testes de lixiviação e solubilização (CETAN), foi possível classificar os resíduos de rochas ornamentais depositados em aterros no município de Cachoeiro de Itapemirim.

5.1.3.1 Extrato lixiviado dos resíduos depositados

A Figura 8 mostra os dados obtidos segundo a análise dos ensaios de lixiviação.

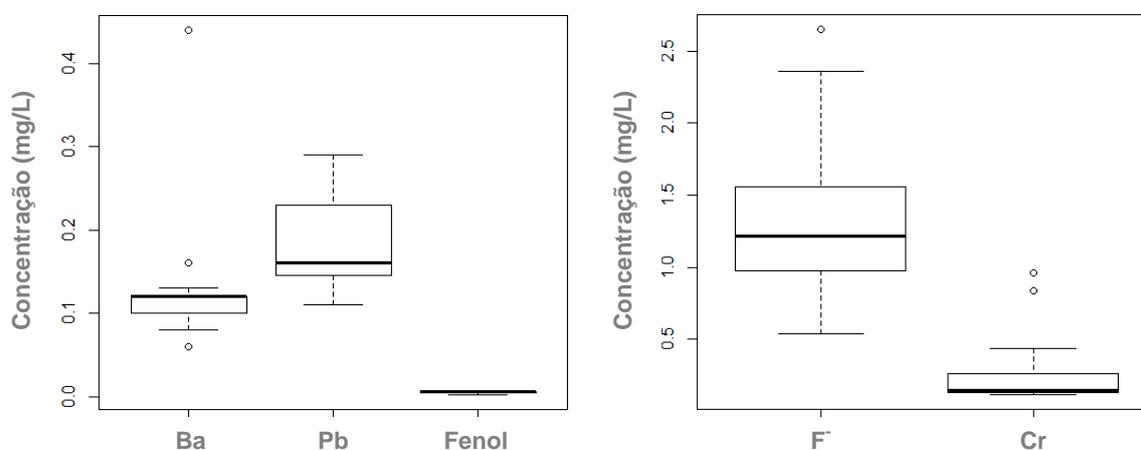


Figura 8 – Concentrações de elementos e substâncias presentes no extrato obtido por meio do procedimento para obtenção do extrato lixiviado de resíduos sólidos de acordo com a NBR 10005 (ABNT, 2004a).

De acordo com a Figura 8, infere-se que o elemento Bário (Ba) apresentou baixos valores de concentração, sendo o maior deles de 0,44 mg/L, estando bem abaixo do limite aceitável (70 mg/L) pela norma NBR 10004 (ABNT, 2004). Analisando os dados da concentração de Chumbo (Pb), percebe-se que as amostras coletadas não apresentaram valores muito discrepantes, mantendo-se na faixa de 0,11 a 0,29

mg/L, também abaixo do valor máximo permitido pela norma, de 1 mg/L. O composto fenol, apresentou concentrações bem próximas a zero, o que é importante por se tratar de uma substância muito tóxica, sendo que a norma não estabelece um limite seguro para este composto no extrato lixiviado. Quanto ao Fluoreto (F⁻) e o Cromo (Cr), ambos também apresentaram concentrações abaixo do permitido, mantendo-se em uma faixa segura. Os demais elementos analisados no teste de lixiviação, Prata (Ag), Mercúrio (Hg), Selênio (Se), Cádmio (Cd) e Arsênio (As) apresentaram concentrações abaixo de seus respectivos limites de detecção do equipamento de leitura, sendo eles: 0,11; 0,0001; 0,005; 0,13 e 0,005 mg/L respectivamente e, portanto, abaixo do valor máximo permitido no extrato lixiviado. De acordo com os dados, e segundo a norma NBR 10004, pode-se dizer que o resíduo em questão não é perigoso devido ao fato de nenhum elemento ou composto ultrapassar os limites de concentrações aceitáveis pelo anexo F da norma citada, sendo, portanto, classificado como Não Perigoso (Classe II).

A Tabela 5 expressa a média das concentrações e o desvio padrão dos elementos e substâncias analisados de acordo com o teste de lixiviação para cada um dos 4 depósitos estudados. As médias dos parâmetros de cada depósito foram comparadas buscando-se verificar possíveis diferenças entre os locais estudados. Os dados representados na Tabela 5 também estão presentes graficamente na Figura 9.

Tabela 5 – Análise estatística dos parâmetros lixiviados

Depósitos	pH	Bário (mg/L)	Chumbo (mg/L)	Fluoreto (mg/L)	Fenol (µg/L)
D1	10,00 ± 0,63 a	0,45 ± 0,44 a	0,17 ± 0,05 a	1,02 ± 0,26 a	4,49 ± 1,67 a
D2	9,67 ± 0,82 a	0,10 ± 0,03 ab	0,16 ± 0,05 a	1,27 ± 0,61 a	4,82 ± 1,33 a
D3	10,67 ± 0,52 a	0,13 ± 0,02 ab	0,20 ± 0,07 a	1,71 ± 0,57 a	6,18 ± 0,72 a
D4	10,67 ± 0,82 a	0,06 ± 0,06 b	0,21 ± 0,04 a	1,51 ± 0,61 a	5,15 ± 1,68 a

Parâmetros que apresentam todas as médias com letras minúsculas iguais na coluna não diferem entre si, pelo teste F (nível de confiança, 95%), enquanto parâmetros que possuem médias seguidas de letras diferentes apresentam diferença entre elas, pelo teste de Tukey, (nível de confiança, 95%).

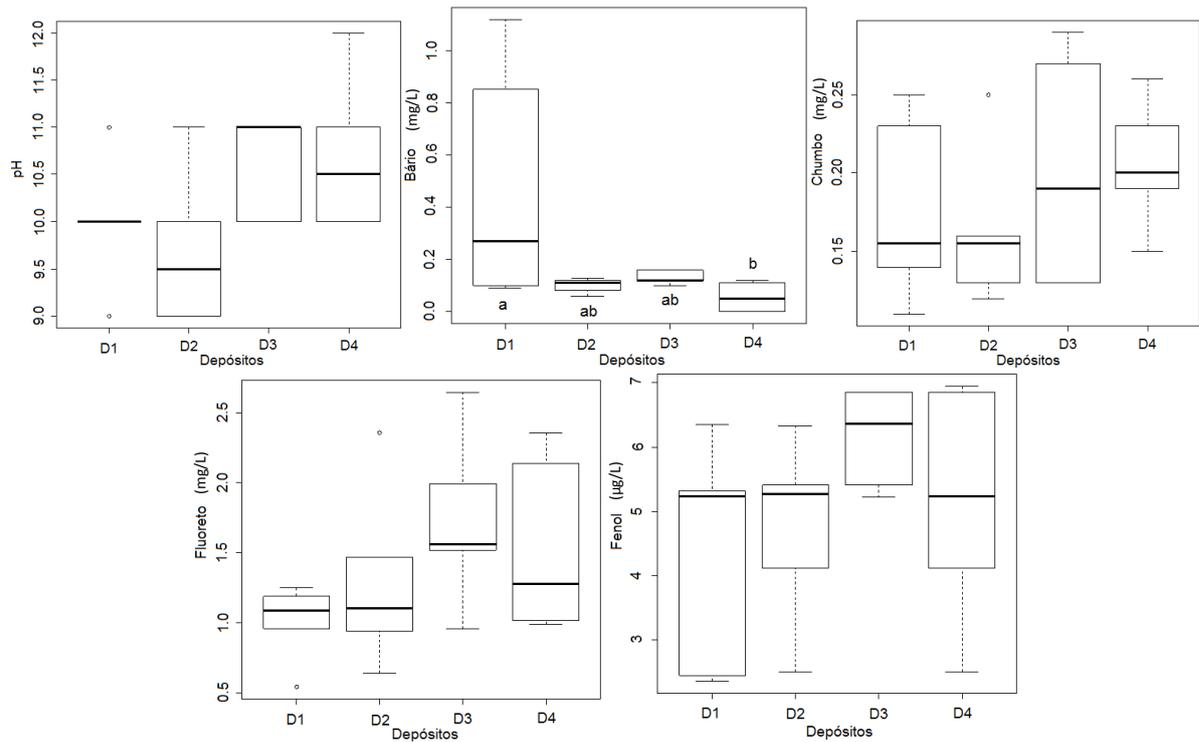


Figura 9 - Dados obtidos após ensaio estatístico sobre os parâmetros analisados pelo teste de lixiviação.

De acordo com a análise de variância para os elementos analisados no teste de lixiviação, conclui-se que o parâmetro pH, assim como o Chumbo, Fluoreto e Fenol apresentaram, de acordo com o teste F, médias referentes aos depósitos estatisticamente iguais, ou seja, não podendo ser consideradas diferentes.

Por fim, o elemento bário apresentou diferença significativa entre as médias nos depósitos 1 e 4.

5.1.3.2 Extrato solubilizado dos resíduos depositados

A Figura 10 mostra os resultados obtidos segundo a análise dos ensaios de solubilização realizados no CETAN.

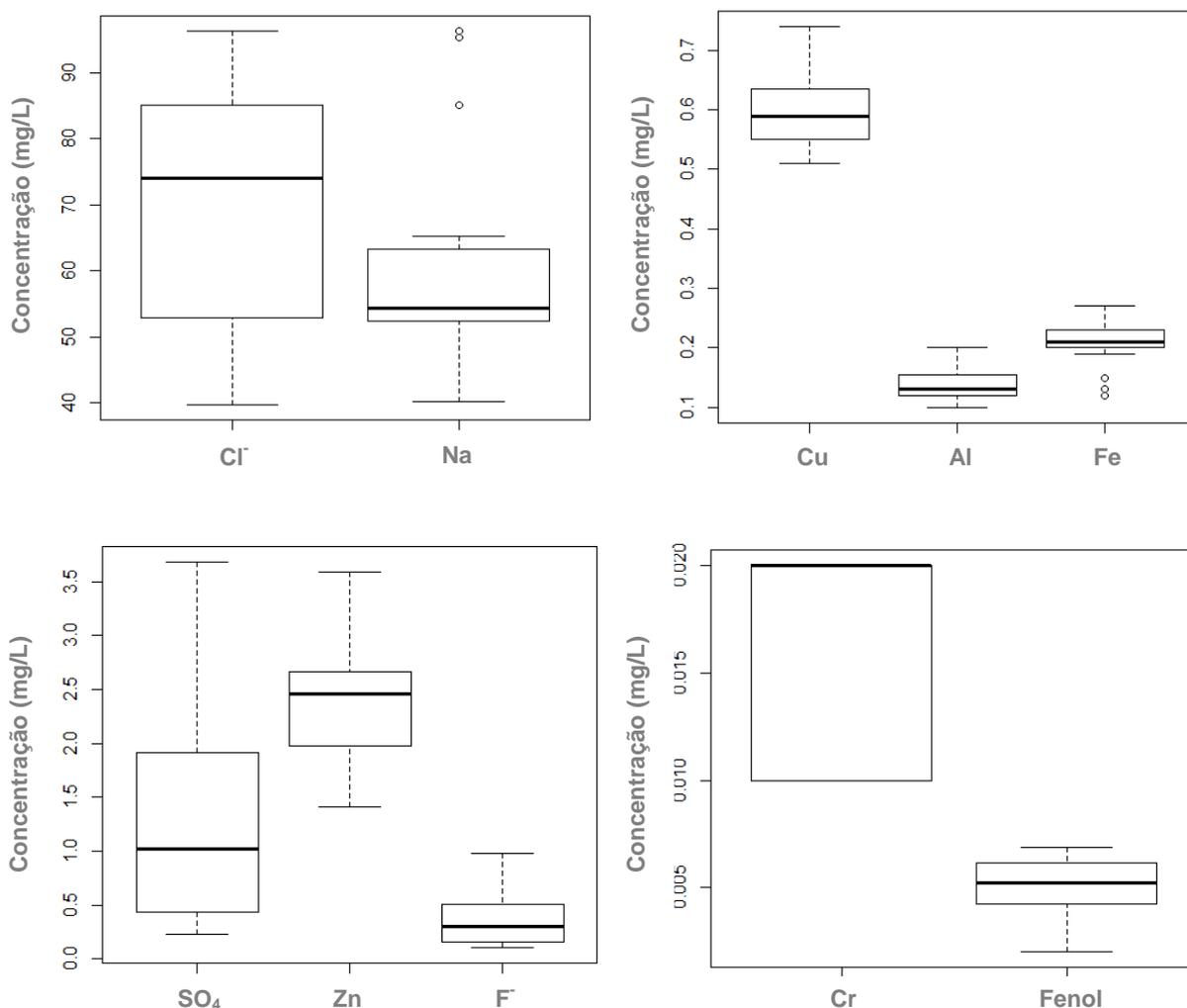


Figura 10 - Concentrações de elementos e substâncias presentes no extrato obtido por meio do procedimento para obtenção do extrato solubilizado de resíduos sólidos, de acordo com a NBR 10006 (ABNT, 2004b).

O Cloreto (Cl⁻) e o Sódio (Na) apresentaram maiores concentrações quando comparados aos demais elementos analisados, porém, ainda estando abaixo do limite máximo permitido (LMP) pelo anexo G da norma NBR 10004, de 250 e 200 mg/L respectivamente (Figura 10). Os dados referentes ao Cobre (Cu), Alumínio (Al) e Ferro (Fe) se mostraram sem muita discrepância entre os pontos, no entanto, foram os elementos que mais se aproximaram do valor máximo permitido pela norma, principalmente o Ferro e o Alumínio, com LMP de 0,3 e 0,2 mg/L respectivamente. O composto Sulfato (SO₄) apresentou valores de concentração bem dispersos e distantes do LMP, 250 mg/L, diferentemente do Zinco (Zn) e Fluoreto (F⁻) que se aproximaram de seus valores limites, de 5 e 1,5 mg/L respectivamente. O Cromo (Cr) foi o elemento analisado de concentração mais

uniforme, já que as leituras obtidas foram 0,01 e 0,02 mg/L ou então não detectável pelo equipamento, também próximo de seu LMP de 0,05 mg/L. O Fenol, assim como alguns elementos também apresentou valores de concentração próximas do limite, neste caso, de 0,01 mg/L.

Os demais elementos, Arsênio (As), Bário (Ba), Cádmio (Ca), Manganês (Mn), Mercúrio (Hg), Prata (Ag) e Selênio (Se) apresentaram concentrações abaixo do limite de detecção do equipamento e abaixo do LMP.

Como nenhum dos constituintes analisados apresentou valores de concentração acima do LMP da norma NBR 10004, pode-se dizer que esse resíduo é Não Perigoso e Inerte (Classe II B).

A Tabela 6 expressa a média das concentrações e o desvio padrão dos elementos e substâncias analisados de acordo com o teste de solubilização para cada um dos 4 depósitos estudados. As médias dos parâmetros de cada depósito foram comparadas estatisticamente buscando-se verificar possíveis diferenças entre os locais estudados. Os dados representados na Tabela 6 também estão presentes graficamente de acordo com na Figura 11.

Tabela 6 - Análise estatística dos parâmetros solubilizados

Depósitos	pH	Alumínio (mg/L)	Cloreto (mg/L)	Cobre (mg/L)
D1	9,83 ± 0,75 b	0,15 ± 0,02 a	73,20 ± 18,50 a	0,11 ± 0,28 a
D2	9,67 ± 0,52 b	0,13 ± 0,04 a	52,87 ± 27,82 a	0,18 ± 0,28 a
D3	10,33 ± 0,52 ab	0,14 ± 0,03 a	63,00 ± 18,89 a	0,38 ± 0,29 a
D4	10,83 ± 0,41 a	0,14 ± 0,02 a	80,45 ± 14,94 a	0,43 ± 0,34 a

Depósitos	Fluoreto (mg/L)	Sódio (mg/L)	Sulfato (mg/L)	Zinco (mg/L)
D1	0,20 ± 0,11 a	53,22 ± 9,81 a	2,01 ± 0,89 a	2,14 ± 0,39 a
D2	0,31 ± 0,13 a	65,43 ± 15,84 a	1,41 ± 0,99 ab	2,45 ± 0,68 a
D3	0,59 ± 0,26 a	52,77 ± 7,04 a	1,01 ± 0,88 ab	2,73 ± 0,60 a
D4	0,43 ± 0,39 a	67,20 ± 18,39 a	0,61 ± 0,35 b	2,40 ± 0,53 a

Depósitos	Cromo (mg/L)	Ferro (mg/L)	Fenol (µg/L)	Alcalinidade (mg/L CaCO₃)
D1	0,00 a	0,19 ± 0,04 a	4,53 ± 0,91 bc	849,00 ± 141,13 a
D2	0,01 ± 0,01 a	0,22 ± 0,02 a	5,60 ± 0,56 ab	881,50 ± 118,89 a
D3	0,01 ± 0,01 a	0,23 ± 0,03 a	6,29 ± 0,62 a	797,83 ± 150,26 a
D4	0,01 ± 0,01 a	0,19 ± 0,04 a	3,94 ± 1,08 c	957,33 ± 50,90 a

Parâmetros que apresentam todas as médias com letras minúsculas iguais na coluna não diferem entre si, pelo teste F (nível de confiança, 95%), enquanto parâmetros que possuem médias seguidas de letras diferentes apresentam diferença entre elas, pelo teste de Tukey, (nível de confiança, 95%).

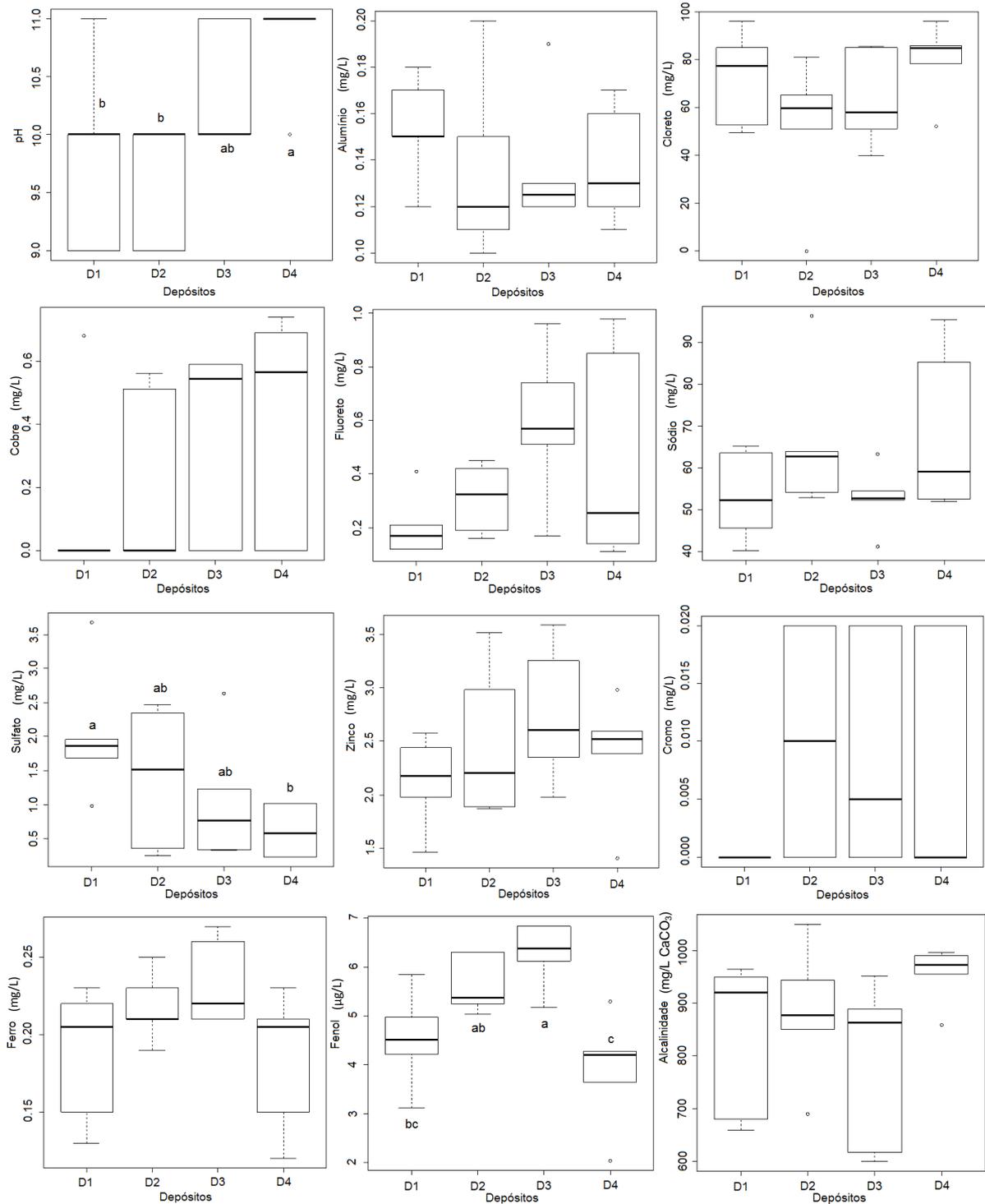


Figura 11 - Dados obtidos após ensaio estatístico sobre os parâmetros analisados pelo teste de solubilização.

De acordo com a análise de variância realizada para as médias dos elementos obtidos através da solubilização, constatou-se que o parâmetro Alcalinidade, assim como os elementos Al, Cu, Cr, Fe, Na, Zn e os íons Cloreto e Fluoreto, não

apresentaram diferença significativa entre as médias analisadas, de acordo com o teste F. Desse modo, suas médias não podem ser consideradas estatisticamente diferentes quando comparadas com as médias das mesmas substâncias coletadas em diferentes depósitos.

O parâmetro pH apresentou médias semelhantes para os depósitos 1, 2 e 3, enquanto a média do depósito 4 é considerada igual a média do depósito 3.

O Sulfato apresentou médias semelhantes para os depósitos 1, 2 e 3, assim como para 2, 3 e 4 enquanto o composto fenol obteve similaridade para as médias dos depósitos 1 e 2, 1 e 4, e 2 e 3.

5.2 Resíduos segregados por tipo litológico

5.2.1 Granulometria dos resíduos segregados

A distribuição granulométrica das amostras de resíduos segregados, indicados pela Tabela 7, expressa a quantidade em porcentagem de massa de partículas retidas nas peneiras que seguem: 60 (0,250 mm), 115 (0,125 mm), 250 (0,063 mm), 325 (0,045 mm) Mesh, acompanhado de um caixilho de fundo, correspondente às frações de diâmetros menores que 0,045 mm.

Tabela 7: Granulometria das amostras de resíduos segregados

PENEIRA (mesh)	# 60	# 115	# 250	# 325	caixilho
TAMANHO DA PARTÍCULA (mm)	0,25	0,125	0,063	0,045	< 0,045
Amarelo Icarai	0,2	4,5	9,0	7,6	78,7
Amarelo Samoa	0,3	3,6	9,4	8,9	77,9
Blue Fire	0,4	5,6	17,6	9,4	66,9
Branco Dallas	0,6	5,5	12,4	6,3	75,2
Dourado Carioca	0,1	1,4	5,3	4,2	89,0
Ocre Itabira	0,3	4,0	10,2	6,3	79,2
Preto Aracruz	1,5	7,2	10,7	8,9	71,7
Preto Indiano	1,0	6,4	16,0	7,4	69,2
Verde Pérola	5,4	7,5	14,0	6,9	66,3
Mármore Aquarela	0,0	1,9	12,5	7,9	77,8

OBS 1: Valores em % de partículas que ficaram retidas em cada peneira.

OBS 2: A granulometria do tipo litológico Branco Ceará (BC) não foi analisada.

De acordo com a Tabela 7, todas as amostras analisadas apresentaram que a maior parte de suas partículas se concentraram no caixilho, sendo assim, a grande maioria

dos particulados possuem diâmetros menores que 0,045 mm, concluindo ser um resíduo muito fino.

A figura 12 representa a porcentagem média do tamanho de partículas obtidas através da mistura das amostras de resíduos segregados por tipos litológicos.

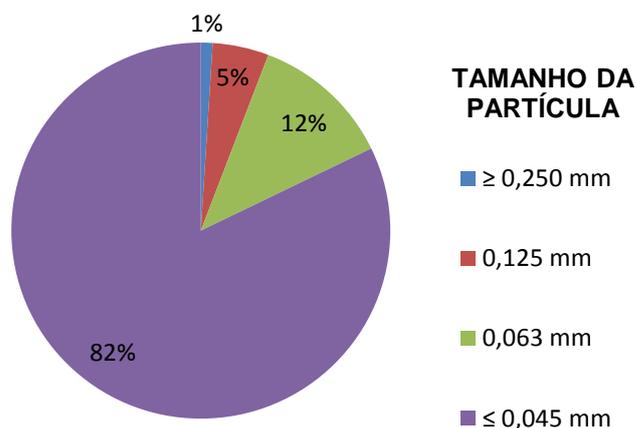


Figura 12: Porcentagem média do tamanho de partículas dos resíduos segregados.

Os resíduos segregados apresentaram de forma unânime granulometria menor que os resíduos coletados em depósitos. Em relação à porcentagem média do tamanho das partículas, enquanto os resíduos depositados continham 61% das partículas menores ou iguais a 0,045 mm (Figura 6), os resíduos segregados apresentaram 82% do total de partículas (Figura 12). Isso se deve, possivelmente, ao fato destes serem coletados logo na saída do tear, após o beneficiamento da rocha, enquanto os resíduos provenientes dos depósitos, antes da coleta, ficaram um bom tempo em contato com outros tipos arenosos quando depositados.

5.2.2 Composição química dos resíduos segregados

De acordo com a análise química (FRX) da composição das amostras dos resíduos segregados, obteve-se a porcentagem dos compostos representados pela Tabela 8, onde AI (Amarelo Icaraí), AS (Amarelo Samoa), BD (Branco Dallas), BF (Blue Fire), DC (Dourado Carioca), OI (Ocre Itabira), PA (Preto Aracruz), PI (Preto Indiano), VP (Verde Pérola), MA (Mármore Aquarela).

Tabela 8 – Composição química dos resíduos segregados por tipos litológicos

Amostras	Composição Química (%)							
	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂
AI	66,28	2,51	10,61	12,76	0,18	4,57	2,28	0,14
AS	67,24	2,29	12,14	9,73	0,48	5,05	2,14	0,33
BD	70,39	1,31	10,9	9,27	0,17	5,17	2,11	0,16
BF	65,66	2,13	13,1	10,15	2,32	3,3	1,92	0,88
DC	64,17	2,94	12,42	10,84	0,77	4,91	2,71	0,74
OI	53,07	7,93	15,42	10,85	2,62	5,26	3,47	0,82
PA	48,27	8,64	14	13,89	4,41	2,26	2,58	3,06
PI	61,86	3,06	14,09	10,56	2,39	3,4	2,01	0,85
VP	54,32	2,71	12,28	21,38	0,71	4,59	2,71	0,76
MA	1,67	38,78	0,65	0,51	15,83	0,03	0,01	0,02

OBS: Não foi realizada a análise química (FRX) do tipo litológico Branco Ceará (BC).

De acordo com a Tabela 8, sugere-se que quase todos os tipos litológicos apresentados sejam rochas silicáticas, devido a elevada quantidade de Sílica (SiO₂) presente em sua composição química. A única exceção se deve ao Mármore Aquarela, que, por pertencer ao grupo de rochas carbonáticas, apresenta pequena quantidade de Sílica e maior quantidade de Cálcio (Ca) e Magnésio (Mg), características destes tipos de rochas.

5.2.3 Solubilização de elementos dos resíduos segregados

De acordo com o primeiro gráfico da Figura 13, destacam-se com as maiores concentrações solubilizadas do elemento Sódio (Na) os litotipos Branco Ceará (BC), Amarelo Icaraí (AI) e Ocre Itabira (OI), com respectivamente 76,4; 67,3 e 59,6 mg/L, sugerindo possíveis rochas silicáticas (granito). No caso do Mármore Aquarela (MA), esta apresentou uma concentração de Na muito baixa (0,2 mg/L) por ser uma rocha carbonática.

O segundo gráfico apresenta no geral valores mais próximos, com menor discrepância entre o maior e o menor. Apresentaram maiores concentrações de Potássio (K) Branco Dallas (BD) e Dourado Carioca (DC) com 33,7 e 32,3 mg/L, enquanto que o menor valor pertence novamente ao Mármore Aquarela (3,8 mg/L).

Do mesmo modo, o terceiro gráfico também apresenta valores próximos no geral, porém há grande discrepância entre o maior e o menor. A rocha tipo Preto Aracruz (PA) apresentou a maior quantidade de Cálcio (Ca) solubilizado entre as amostras (3,21 mg/L), enquanto que curiosamente o Mármore Aquarela (MA) apresentou uma

concentração baixa (0,30 mg/L), já que rochas carbonáticas apresentam uma composição rica em Ca, como está destacado na Tabela 8.

A Figura 13 a seguir, expressa os resultados dos ensaios de solubilização (UFES) para os diferentes tipos de rochas estudadas.

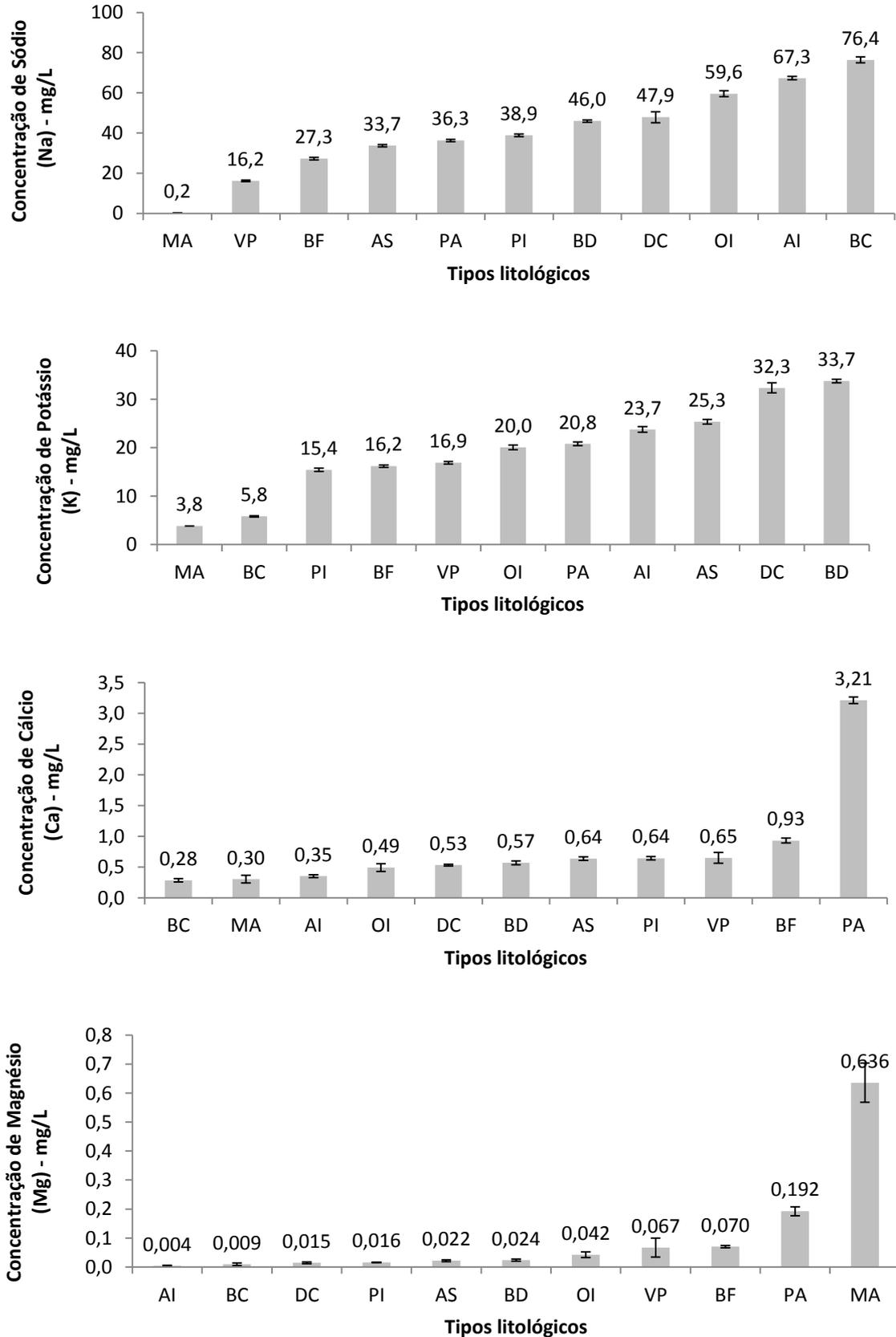


Figura 13 - Dados obtidos da solubilização de diferentes tipos litológicos, referentes à concentração (mg/L) de Sódio, Potássio, Cálcio e Magnésio respectivamente.

No último gráfico da Figura 13 ocorre a maior diferença entre os maiores e menores valores de concentração exibidos pelos gráficos, representados respectivamente por Mármore Aquarela (0,636 mg/L) e Amarelo Icaraí (0,004 mg/L). A elevada quantidade de Magnésio (Mg) solubilizado no mármore em relação aos demais se deve ao fato desta ser uma rocha carbonática.

Os mesmos dados obtidos através da solubilização dos tipos litológicos estão representados graficamente na Figura 14, observando-se as variações das concentrações dos elementos Mg, Ca, Na e K solubilizados em cada amostra.

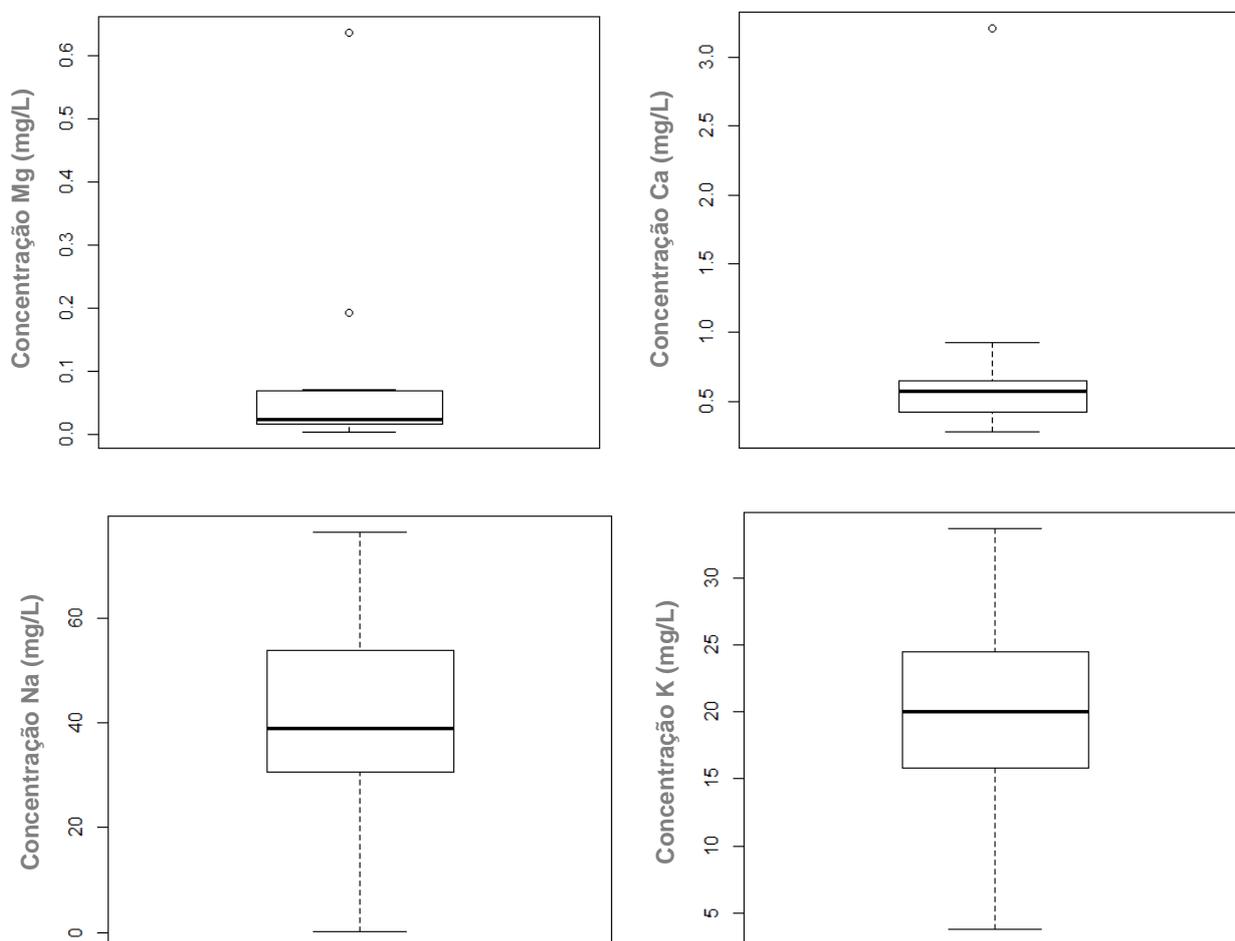


Figura 14 – Dados obtidos através da solubilização dos diferentes tipos litológicos estudados, representados de acordo com a variação das concentrações solubilizadas.

De acordo com as concentrações referentes aos elementos Mg e Ca, infere-se que os valores obtidos apresentaram maior uniformidade, com exceção de alguns valores afastados dos demais (outliers). Em relação às concentrações solubilizadas

dos elementos Na e K, observa-se valores distribuídos de formas similares, apresentando maior variação entre as concentrações obtidas, evidenciando os valores máximos e mínimos em relação à média.

5.2.3.1 *Comparação entre composição química e extrato solubilizado*

A Figura 15 representa os gráficos de relação entre a composição química (FRX) e a concentração dos elementos obtidos a partir do teste de solubilização, dos tipos litológicos estudados.

Analisando-se a Figura 15, percebe-se que os pontos relacionados nos gráficos geralmente seguem um padrão, ou seja, os pontos referentes à concentração dos elementos, na maioria das vezes, seguem a tendência dos pontos alusivos à composição química, o que já era esperado. A maior discrepância vista entre estes pontos está na Figura 15 (c), onde o resíduo do Mármore Aquarela (MA) apresenta elevada porcentagem do composto Óxido de Cálcio (CaO) em sua composição, entretanto exibe uma baixíssima concentração referente ao elemento Cálcio (Ca), muito provavelmente por ter sido serrado em tear multifios (fios diamantados) sem a adição de cal no processo. O contrário pode ser observado no resíduo da rocha PA.

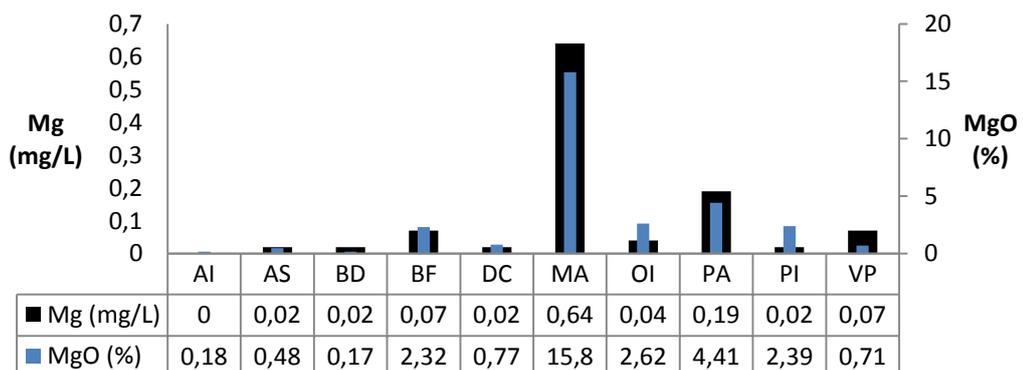
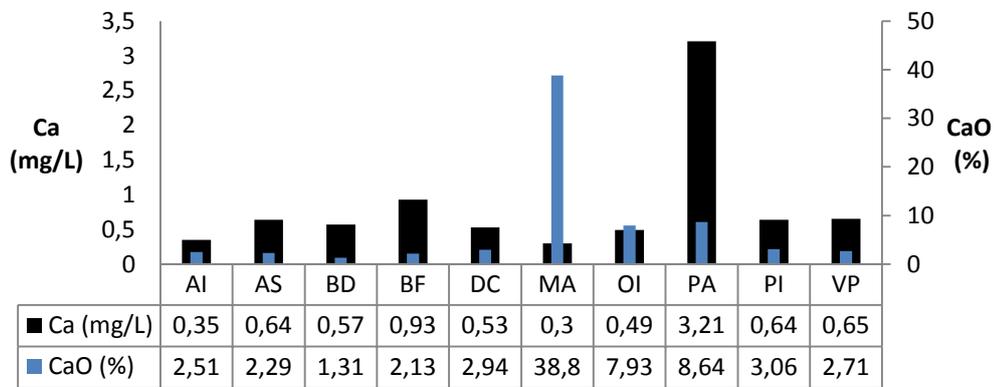
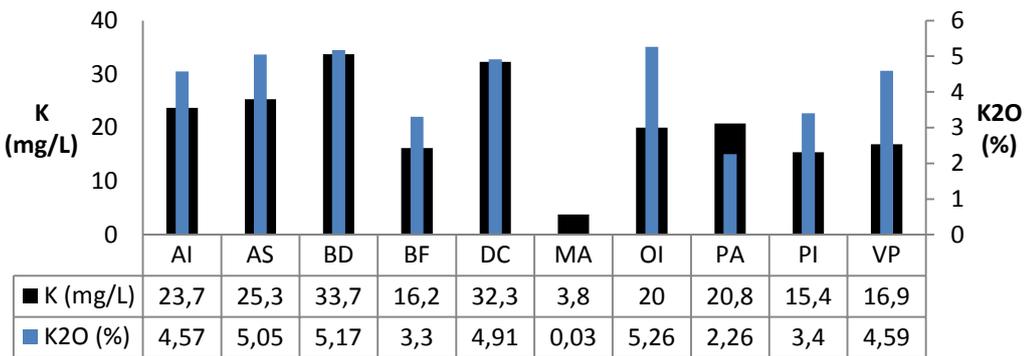
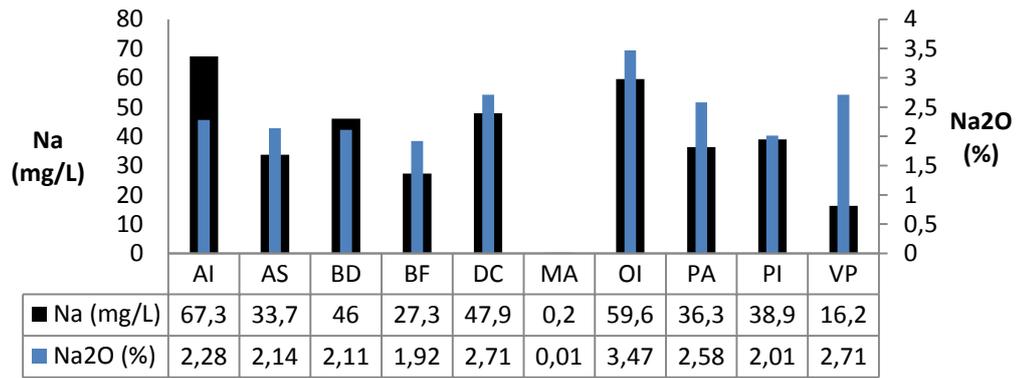


Figura 15 – Gráficos de relação entre a composição química e a concentração dos elementos obtidos por solubilização. A Figura 14 (a), (b), (c) e (d) se referem respectivamente a concentração de Sódio (Na), Potássio (K), Cálcio (Ca) e Magnésio (Mg).

5.3 Possíveis utilizações dos resíduos estudados como matéria prima

5.3.1 Tijolos maciços

De acordo com alguns autores (BILDHAUER et al., 2015 e MOREIRA, FREIRE e HOLANDA, 2003) a argila comumente utilizada como matéria prima na confecção de tijolos, blocos entre outros materiais cerâmicos apresenta uma composição aproximada de 59% de Sílica (SiO_2) e 15% de Alumina (Al_2O_3), entre outros elementos presentes em menores quantidades.

Analisando-se a composição química dos resíduos depositados, através dos dados de FRX, observa-se que as amostras referentes aos depósitos 1, 2 e 3 apresentam quantidades de Sílica e Alumina próximas a argila, sendo possível a utilização destes resíduos na confecção de materiais cerâmicos.

Em relação aos tipos litológicos distintos, os resíduos provenientes de rochas silicáticas apresentam em sua estrutura quantidades de Sílica e Alumina mais próximas a argila do que o resíduo proveniente do corte de mármore. Entre os tipos estudados pode-se destacar o Blue Fire (BF), Dourado Carioca (DC) e Preto Indiano (PI) como possíveis insumos.

Além da composição química, também é válido ressaltar a importância da granulometria das amostras, que neste caso é bem superior à argila (diâmetro dos grãos $\leq 0,002$ mm), sendo recomendável a utilização de uma porcentagem menor de resíduos, variando em até 40% da massa utilizada.

5.3.2 Concreto

Segundo Gonçalves (2000), a adição de resíduos provenientes do beneficiamento do granito ao cimento, a uma taxa de 10 a 20%, não só é viável como também foram constatados a melhora de alguns parâmetros testados. Como observado no comportamento de algumas propriedades mecânicas, principalmente na resistência à tração e compressão do concreto endurecido. O resíduo utilizado pelo autor

apresentava uma composição química de aproximadamente 59 e 13% de Sílica e Alumina respectivamente.

Pelo fato desta composição se aproximar a da argila mencionada anteriormente, pode-se destacar que tanto os resíduos provenientes dos depósitos 1, 2 e 3 quanto os tipos segregados BF, DC e PI poderiam ser possivelmente adicionados para produção de concreto.

5.3.3 Vidro sodo-cálcico

De acordo com Babisk (2009), os resíduos provenientes do beneficiamento de rochas ornamentais podem ser utilizados como matéria prima na fabricação de garrafas, janelas, entre outros produtos vitrocerâmicos. Quanto à composição química, esse material apresenta uma elevada quantidade de Sílica, variando de 71 a 74%, seguido do Óxido de Sódio (Na_2O), de 12 a 16%.

Em relação aos resíduos depositados, tem-se como mais recomendáveis a esta prática os resíduos pertencentes aos depósitos 2 e 3, por apresentarem maiores quantidades de Sílica, sendo suas médias superiores a 60%.

No caso dos resíduos segregados, destacam-se o Blue Fire (BF), Amarelo Icarai (AI), Amarelo Samoa (AS) e principalmente o Branco Dallas (BD) com porcentagens de Sílica variando aproximadamente de 65, 66, 67 e 70% respectivamente.

5.3.4 Correção da acidez do solo e enriquecimento mineral

Através do processo de rochagem, ou seja, técnica de fertilização natural do solo utilizando resíduos de rochas, pode-se adicionar uma fonte de Potássio (K) e também Cálcio (Ca) e Magnésio (Mg) oriundos respectivamente dos resíduos de granitos e mármore.

Quanto aos resíduos depositados, pode-se utilizar os resíduos provenientes dos depósitos 1, 2 e 3 para o enriquecimento de Potássio do solo, uma vez que estes depósitos concentram em sua maior parte resíduos graníticos. Já o depósito 4 apresenta uma quantidade maior do resíduo proveniente do beneficiamento do mármore, contribuindo principalmente com a adição de Cálcio e Magnésio, promovendo a correção de acidez do solo.

Em relação aos resíduos segregados, de acordo com o teste de solubilização, o Mármore Aquarela (MA) e o Preto Aracruz (PA) poderiam ser utilizados como

corretivo de acidez do solo, contribuindo com as adições de Magnésio e Cálcio respectivamente. Os outros tipos, provenientes do granito, poderiam ser utilizados como fonte de Potássio, principalmente o Branco Dallas (BD) e o Dourado Carioca (DC) devido a maior solubilização do Potássio nestas amostras.

6 CONCLUSÕES

A partir do estudo referente aos resíduos coletados dos quatro depósitos analisados, pode-se concluir que, de acordo com os dados de lixiviação e solubilização apresentados, os resíduos foram classificados como Inertes (Classe II-B), isso porque nenhum dos constituintes analisados apresentou valores de concentração acima do limite máximo permitido pela norma NBR 10004. De acordo com as comparações estatísticas entre as médias dos parâmetros obtidos por FRX e os ensaios de lixiviação e solubilização, conclui-se que em relação às composições químicas (FRX) analisadas, pelo menos uma média se diferenciou das demais, como foi observado o depósito de número 4, apresentando maiores discrepâncias entre os valores quando comparados com os depósitos 1, 2 e 3. Em relação às concentrações obtidas através dos ensaios de lixiviação e solubilização, pode-se dizer que a maioria dos parâmetros analisados não apresentaram evidências estatísticas de que as médias sejam diferentes, mostrando uma maior similaridade entre os valores das concentrações dos depósitos estudados.

Quanto aos resíduos segregados por tipos litológicos, comparando-se os resultados dos testes de solubilização e de sua composição química (FRX), verifica-se que a presença de seus constituintes não ocorre de forma homogênea. Além disso, embora ocorra solubilização de elementos constituintes das rochas, os insumos externos utilizados durante o processo de beneficiamento, como a cal, granalha de aço e resina de polimento, influenciam nos resultados e conseqüentemente na fração solubilizada dos resíduos.

7 REFERÊNCIAS

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**. p. 116–120, 2016.

ALENCAR, C. R. A. **Manual de caracterização, aplicação, uso e manutenção das principais rochas comerciais no Espírito Santo**: rochas ornamentais. 1^o. ed. Cachoeiro de Itapemirim: Instituto Euvaldo Lodi - IEL, 2013. 242 p. Disponível em: <<http://www.sindirochas.com/arquivos/manual-rochas.pdf>>. Acesso em: 29 mar.2017.

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.

ARAUJO, E. R.; OLIVIERI, R. D.; FERNANDES, F. R. C. Atividade mineradora gera riqueza e impactos negativos nas comunidades e no meio ambiente. **CETEM**. Rio de Janeiro. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: Classificação de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004. 77 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7217**: Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 1987. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10005**: Procedimentos para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004a. 20 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10006**: Procedimentos para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004b. 7 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15012**: Rochas para revestimentos de edificações - Terminologia. Rio de Janeiro, 2003. 10 p.

BABISK, M. P. Desenvolvimento de Vidros Sodo-Cálcicos a Partir de Resíduos de Rochas Ornamentais. **Dissertação de Mestrado**. Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro. 2009.

BARRIENTOS, V.; DELGADO, J.; NAVARRO, V.; JUNCOSA, R.; FALCÓN, I.; VÁSQUES, A. Characterization and Geochemical–geotechnical Properties of Granite Sawdust Produced by the Dimension Stone Industry of O Porriño (Pontevedra, Spain). **Jornal Trimestral de Geologia e Hidrogeologia de Engenharia**, v. 43, p. 141-155, 2010.

BECKHOFF, B.; KANNGIEßER, B.; LANGHOFF, N.; WEDELL, H.; WOLFF, H. (Eds.). **Handbook of Practical X-Ray Fluorescence Analysis**. Springer Science & Business Media, 2007. 863 p.

BILDHAUER, D. C.; BRUXEL, F. R.; SANTANA, E. R. R.; OLIVEIRA, E. C. Tijolos Maciços com Características Refratárias a partir da Incorporação de Resíduos de mármore e granito. **Revista Liberato**, Novo Hamburgo, v. 16, n. 25, p. 01-100, jan./jun. 2015.

BRAGA, F. S.; BUZZI, D. C.; COUTO, M. C. L.; LANGE, L. C. **Caracterização Ambiental de Lamas de Beneficiamento de Rochas Ornamentais**. Eng. Sanit. Ambient, v. 15, n. 3, p. 237-244, jul/set. 2010.

BRASIL, Ministério do Meio Ambiente – MMA. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Disponível em < <http://www.mma.gov.br/pol%C3%ADtica-de-res%C3%ADduos-s%C3%B3lidos>>. Acesso em: 30 jun. 2017.

COLA, G. P. A.; SIMÃO, J. B. P. Rochagem como forma alternativa de suplementação de potássio na agricultura agroecológica. **Revista Verde** (Mossoró – RN), v. 7, n. 4, p. 15-27, 2012.

DA COSTA, A. S. V.; HORN, A. H.; DONAGEMMA, G. K.; DA SILVA, M. B. Uso do resíduo de granito oriundo da serraria e polimento como corretivo e fertilizante de solos. **Geonomos**. v.18, n.1, p. 23-27, 2010.

ESPÍRITO SANTO, Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos - IEMA. **Instrução Normativa N.º 11 de 11 de outubro de 2016**. Disponível em: <file:///C:/Users/Marcello/Downloads/Instru%C3%A7%C3%A3o%20Normativa%2011_2016_res%C3%ADduos%20RO%20(3).pdf>. Acesso em: 01/05/2018.

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, p. 615-624, 2012.

GONÇALVES, J. P. Utilização do Resíduo de Corte de Granito (RCG) Como Adição para Produção de Concretos. **Dissertação de Mestrado**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2000.

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 Agronômica**. v. 47, n. 4, p. 720-728, 2016.

LEITE, M. G. P.; FUJACO, M. A. G. A Atividade de Beneficiamento de Quartzitos na Cidade de Ouro Preto - Brasil: Características Gerais e Principais Impactos Ambientais. **Economía, Sociedad y Territorio**, v. 8, n. 41, p. 227-243, 2013.

LOUDES, H.; KAUPPILA, P. M.; LOUDES, N.; AATOS, S.; KALLIONEN, J.; LUUKKANEN, S.; AALTO, J. **Characteristics and the Environmental Acceptability of the Natural Stone Quarrying Waste Rocks**, Bull Eng. Geol. Environ, v. 71, p. 257–261, 2012.

MANHÃES, J. P. V. T.; DE HOLANDA, J. N. F. Caracterização e Classificação de Resíduo Sólido “Pó de Rocha Granítica” Gerado na Indústria de Rochas Ornamentais. **Quim. Nova**, v. 31, n. 6, p. 1301-1304, 2008.

MARCHI, C. M. D. F. Cenário mundial dos resíduos sólidos e o comportamento corporativo brasileiro frente à logística reversa. **Perspectivas em gestão & conhecimento**, João Pessoa, v. 1, n. 2, p. 118-135, 2011.

MENEZES, R. R.; FERREIRA, H. S.; NEVES, G. A.; LIRA, H. L.; FERREIRA, H. C. Use of Granite Sawing Wastes in the Production of Ceramic Bricks and Tiles. **Journal of the European Ceramic Society**, p. 1149–1158, 2005.

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 49**. p. 262-267. 2003.

NEVES, M. A.; BORGES, S. P. T.; SOUZA, P. B. Classification and Use of Fine Wastes From Dimension Stone Industry. **Materials Science Forum**, v. 727-728, p. 1412-1417, 2012.

OLIVEIRA, C. N.; QUEIRÓZ, J. P. C.; RIBEIRO, R. C. C. **Aplicação de Resíduos Oriundos do Corte de Rochas Ornamentais na Produção de Cosméticos**. XVI Jornada de Iniciação Científica do Cetem, Rio de Janeiro. 2009.

PREZOTTI, J. C. S. Resultados de monitoramentos de estações de tratamento de efluentes líquidos de indústrias de beneficiamento de mármore e granito, implantadas no município de Cachoeiro de Itapemirim. In: SEMINÁRIO ESTADUAL SOBRE SANEAMENTO E MEIO AMBIENTE, 5, 2003, Vitória. **Anais...** Vitória: ABES, 2003, p. 1-8.

R Core Team (2017). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

RAYMUNDO, V.; NEVES, M. A.; CARDOSO, M. S. N.; BREGONCI, I. S.; LIMA, J. S. S.; FONSECA, A. B. Resíduos de Serragem de Mármore como Corretivo da Acidez de Solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n.1, p.47–53, 2013.

ROCHA, C. H. B.; SOUSA, J. G. Análise Ambiental do Processo de Extração e Beneficiamento de Rochas Ornamentais com Vistas a uma Produção Mais Limpa: Aplicação Cachoeiro de Itapemirim-ES. **Enciclopédia Biosfera**, Centro Científico Conhecer. Goiânia, v. 6, n. 9, p. 1, 2010.

SINDIROCHAS. Sindicato da Industria de Rochas Ornamentais. 2017. Disponível em: < <http://www.sindirochas.com/downloads/relatorios/exportacoes-de-rochas-dezembro-2017.pdf>>. Acesso em: 18 abr. 2018.

SINDIROCHAS. Sindicato da Industria de Rochas Ornamentais. 2018. Disponível em: < <http://www.sindirochas.com/downloads/relatorios/exportacoes-de-rochas-marco-2018.pdf>>. Acesso em: 13 jan. 2018.

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 91**, p. 685–689, 2010.

VIDAL, F. V.; AZEVEDO, H. C. A.; CASTRO, N. F. **Tecnologia de rochas ornamentais**: Pesquisa, lavra e beneficiamento. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2014. 700 p.