



ISSN: 2447-3359

REVISTA DE GEOCIÊNCIAS DO NORDESTE
Northeast Geosciences Journal

v. 10, nº 2 (2024)

<https://doi.org/10.21680/2447-3359.2024v10n2ID37711>



Composição química e mineralógica de diferentes frações granulométricas dos finos de beneficiamento de rochas ornamentais

Chemical and mineralogical composition of different particle size fractions of fines from dimension stone processing

Mirna Aparecida Neves¹; Jeruza Lacerda Benincá Barbosa²; Lorainy Viana Domingues³; Wenderson Abreu Rosa Nascimento⁴; Eduardo Baudson Duarte⁵

¹ Departamento de Geologia, Universidade Federal do Espírito Santo, Alto Universitário, s.n., Alegre, ES, Brasil. Email: mirna.neves@ufes.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3611-6414>

² Eneva, Praia de Botafogo, 356, Botafogo, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. Email: jeruzabnink@hotmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-8224-9229>

³ Concremat Engenharia e Serviços, Rua Canaã, 132, Grajaú, Belo Horizonte (MG), Brasil. Email: lorainyviana@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3056-1284>

⁴ Itabira Agro Industrial S.A. / Fábrica de Cimento Nassau, BR-482, Gironda, Cachoeiro de Itapemirim, ES, Brasil. Email: wendersonambiental@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6699-2469>

⁵ Coordenadoria do Curso de Bacharelado em Geologia, Instituto Federal do Espírito Santo, Rod. Miguel Curry Carneiro, 799, Nova Venécia, ES, Brasil. Email: eduardobaudson2013@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0023-7350>

Resumo: O beneficiamento de rochas ornamentais gera um resíduo lamoso denominado finos do beneficiamento de rochas ornamentais - fibro. Esse material é considerado como matéria-prima potencial para fabricação de "ecoprodutos", motivando estudos mais detalhados de sua composição. O objetivo deste trabalho foi realizar uma análise detalhada dos atributos químicos e mineralógicos de diferentes frações granulométricas do fibro. As amostras foram submetidas à análise granulométrica, análise química e mineralógica, sendo as duas últimas realizadas a partir do fracionamento granulométrico. Os resultados mostram que a fração passante em peneira de abertura 0,053 mm tem um importante incremento da perda ao fogo e dos teores de ca e k, além de diminuição dos teores de mg, na e fe. Diamantes sintéticos passíveis de aproveitamento são preservados em frações mais grossas e há necessidade de controlar a entrada de sujidades que podem comprometer a qualidade do fibro, caso ele venha a ser aproveitado como matéria-prima.

Palavras-chave: Reciclagem; Resíduos sólidos; Lama abrasiva; FIBRO.

Abstract: The processing for dimension stone production generates a residue called fines from dimension stone processing – fidsp. This material is considered a potential raw material for manufacturing "ecoproducts", motivating detailed studies of its composition. The aim of this work was to analyze the chemical and mineralogical characteristics of different particle size fractions of the fidsp. Samples were analyzed for particle size fractions, chemical and mineralogical composition, the last two carried out after particle fractionation. Results show that the fraction passing the 0,053 mm aperture sieve had a relevant increasing in the loss on fire and in ca an k contents, in addition to decrease in concentrations of mg, na, and fe. Synthetic diamonds that can be reused were preserved in coarser fractions and it is necessary to control the entry of dirt that could worsen the quality of the fidsp, if it is used as raw material.

Keywords: Recycling; Solid wastes; Abrasive mud; FIBRO.

Recebido: 17/09/2024; Aceito: 21/02/2025; Publicado: 09/04/2025.

1. Introdução

O Estado do Espírito Santo é um importante produtor e exportador de rochas ornamentais e de revestimento. Os resíduos gerados a partir do beneficiamento dessas rochas, incluindo a serragem de blocos rochosos e o polimento de chapas brutas, gera resíduos constituídos pelo pó da rocha processada e por insumos utilizados no beneficiamento (KARACA *et al.*, 2012; LUODES *et al.*, 2012; STRZALKOWSKI, 2021). Em decorrência dos elevados volumes descartados, uma opção viável e sustentável de gestão desses resíduos é o seu aproveitamento, buscando transformá-lo em fonte de matéria-prima para outras cadeias produtivas (SOUZA *et al.*, 2010; RANA *et al.*, 2016; AMARAL *et al.*, 2019; BARRETO *et al.*, 2020; GOMES *et al.*, 2020; ALMADA *et al.*, 2023).

A composição desses materiais depende da tecnologia empregada no beneficiamento das rochas (ZICHELLA *et al.*, 2018; 2021). O método de serragem convencional utiliza teares com lâminas de aço, onde se utiliza uma lama de beneficiamento composta por granalha (partículas facetadas de aço), cal e água. Também existe o método de serragem em teares de fios diamantados (ou multifios), que gera um resíduo lamoso composto basicamente por pó de rocha e água. Após a etapa de serragem, as chapas brutas são polidas, gerando um resíduo, também lamoso, onde há agregação de outros tipos de insumos, como produtos coagulantes, resinas e corantes. Todo o resíduo gerado em cada etapa do processo costuma ser misturado antes da desidratação, que precede o descarte e o armazenamento em depósitos ou aterros industriais.

Esses materiais são denominados Finos do Beneficiamento de Rochas Ornamentais - FIBRO pela Instrução Normativa 11-N do Instituto Estadual de Meio Ambiente – IEMA (ESPÍRITO SANTO, 2023), que altera a Instrução Normativa 11/2016 do mesmo órgão (ESPÍRITO SANTO, 2016). A resolução determina um Programa Permanente de Caracterização do Resíduo FIBRO para conhecer as propriedades do FIBRO e identificar possíveis modificações ao longo dos anos decorrentes do possível surgimento de novos insumos, visando à avaliação da necessidade de alteração da estrutura dos aterros industriais destinados ao armazenamento dos resíduos.

Estudos prévios demonstram que é possível o uso do FIBRO como agregado em materiais da construção civil (e.g. MITTRI *et al.*, 2018; AZEVEDO *et al.*, 2019; SILVA *et al.*, 2019), como insumo agrícola (RAYMUNDO *et al.*, 2013; TOZSIN *et al.*, 2015), na recuperação de áreas degradadas e tratamento de efluentes (PÉREZ-SIRVENT *et al.*, 2007; ZORNOZA *et al.*, 2013; NEVES *et al.*, 2019), dentre outros. O uso de resíduos, nos chamados “ecoprodutos”, tem sido apontado como uma ação fundamental na gestão ambiental, pois permite a redução da extração de recursos naturais e a minimização do descarte e dos impactos ambientais.

Considerando-se que o FIBRO é composto por partículas de composição variada, supõe-se que determinados componentes poderão estar mais ou menos concentrados em frações granulométricas específicas, cuja segregação permitiria enriquecer ou retirar elementos que podem ser úteis ou prejudiciais para determinadas aplicações. Desta forma, o objetivo deste trabalho foi caracterizar o FIBRO por meio da descrição detalhada de atributos químicos e mineralógicos de frações granulométricas específicas. O tratamento dos resíduos do setor de rochas ornamentais visando ao seu uso, pode melhorar ou adaptar as características do material, buscando atender às exigências e controle de qualidade da matéria-prima que ele pode constituir.

2. Materiais e métodos

As amostras de FIBRO foram coletadas em Cachoeiro de Itapemirim, município situado no sul do Estado do Espírito Santo, região Sudeste do Brasil. Os locais de coleta foram distribuídos na planta de beneficiamento das empresas, dentro do processo de transformação dos blocos de rocha em chapas e de polimento dessas chapas, tanto no uso de teares convencionais quanto teares de fios diamantados ou multifios (Tabela 1). As amostras da serragem de blocos foram coletadas diretamente na saída da boca do tear, enquanto as amostras do processo de polimento foram coletadas nos tanques de decantação, onde a fase líquida retorna para a planta de beneficiamento após a decantação da fase sólida. O número de amostras coletadas em cada conjunto amostral reflete a predominância de empresas que utilizam tear convencional, que predominam frente as empresas que usam a tecnologia do tear de fios diamantados ou multifios.

As amostras foram homogeneizadas e secas em estufa a 42° C no Laboratório de Geologia Aplicada do Departamento de Geologia da UFES. Após o destorroamento, foram pesadas alíquotas de 100 g em balança de precisão e acondicionadas em garrafas de polietileno resistentes com tampa de rosca, juntamente com 200 mL de água ultrapura. As garrafas foram submetidas à agitação lenta, em agitador rotativo de frascos, por 4 horas. Posteriormente, realizou-se o processo de peneiramento por via úmida, em peneira de abertura de 0,053 mm, com a finalidade de separar os grãos de tamanho silte fino e argila dos grãos mais grossos. O material denominado de passante (partículas em suspensão na água do peneiramento) ficou em repouso em um recipiente de polietileno de alta resistência por pelo menos 24 horas, até que ocorresse a decantação completa das partículas, obtendo-se assim uma fração líquida e uma fração sólida. A

parte líquida foi descartada, enquanto a sólida foi seca em estufa para posterior análise em sedígrafo a laser, onde foram quantificadas as frações entre 0,0001 e 0,053 mm.

Tabela 1 – Locais de coleta de amostras de FIBRO na planta de beneficiamento de empresas do setor de rocha ornamental, com as siglas utilizadas nesse trabalho e número de amostras coletadas em cada local.

TIPO DE BENEFICIAMENTO / LOCAL DE COLETA	SIGLA (AMOSTRA TOTAL)*	SIGLA (FRAÇÃO FINA)**	QUANTIDADE DE AMOSTRAS
Convencional / serragem de blocos	CS	CS-FN	23
Convencional / tanque de decantação	CD	CD-FN	9
Multifios / serragem de blocos	MS	MS-FN	3
Politriz	PD	PD-FN	6

OBS: * amostra completa, sem peneiramento; ** fração fina, passante em peneira com abertura de 0,053 mm.

Fonte: Autores (2025).

O material retido na peneira de 0,053 mm foi desidratado em estufa a 40 °C e peneirado a seco com auxílio de um agitador mecânico e um conjunto de peneiras com as seguintes aberturas: 0,250 mm (60 mesh); 0,125 mm (115 mesh); 0,090 mm (170 mesh); 0,075 mm (200 mesh) e caixilho (que recebeu a fração entre 0,075 e 0,053 mm).

A composição química das amostras (amostra total) e de sua fração fina (menor do que 0,053 mm) foi analisada por espectrometria de fluorescência de raios-x (FRX). Foram confeccionadas pastilhas fundidas, misturando-se 1 g de amostra, 9 g de tetraborato de lítio e 1,5 g de carbonato de lítio. As misturas foram fundidas em uma máquina de fusão por 17 minutos à temperatura de aproximadamente 1.300 °C. As pastilhas fundidas foram analisadas no Laboratório de Geoquímica do Departamento de Geologia da UFES por meio do espectrômetro de fluorescência de raios-X modelo S8Tiger da Bruker. Desta forma, foram obtidos os teores de SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, K₂O, Na₂O, MgO, TiO₂ e MnO, expressos em porcentagem. A determinação da perda ao fogo (PF) foi obtida após a limpeza de cadinhos de porcelana em forno mufla a 1000 °C por 20 minutos, que posteriormente foram colocados em dessecador até atingir temperatura ambiente. Foi pesada uma alíquota de 1,000 g ± 0,001 g de cada amostra nos cadinhos de massa conhecida e o conjunto foi levado para calcinação em forno mufla sob temperatura de 950 °C ± 50 °C por, no mínimo, 50 minutos. Os cadinhos com as amostras foram resfriados em dessecador e foi feita uma nova pesagem até obtenção de um valor de massa constante. A PF foi calculada mediante o cálculo da perda de massa após a calcinação.

A determinação da composição mineralógica das frações mais grossas foi feita no Laboratório de Sedimentologia do Departamento de Geologia da UFES, utilizando-se uma lupa Coleman com aumento de 40 vezes. Essas frações foram fotografadas em lupa de aumento Leica S8APO, com câmera acoplada, e auxílio do programa LAS V49 para captura de imagens, pertencentes ao Laboratório de Imagens Avançadas do Departamento de Ciências Biológicas da UFES.

Para análise mineralógica da fração mais fina, foi utilizada a técnica de difratometria de raios-x (DRX). A preparação das amostras para DRX envolveu sua cominuição em almofariz de ágata até atingir a granulometria passante em peneira de 325 mesh. Cerca de 2 g de cada amostra foram acondicionados em *eppendorfs* e enviados ao Laboratório de Engenharia Química da UFES para análise em difratômetro de raios-X *Rigaku Miniflex 600-C*, com tubo de cobre (CuK α , λ = 1,5406 Å), operando a 40 kV e 20 mA. O ângulo 2 θ inicial foi de 5° e o final de 70°, o passo empregado foi de 0,02° e a taxa de varredura igual a 10° (2 θ)/min. Os difratogramas foram analisados e interpretados por meio do *software X'Pert HighScore Plus da Panalytical*, com banco de dados acoplado.

3. Resultados

3.1 Granulometria

O FIBRO é composto por grãos muito finos, com partículas geralmente no intervalo entre 1,000 e 0,001 mm (Figura 1). Nas amostras do processo de serragem em tear convencional (CS) até 10 % das partículas possuem entre 0,09 mm e 2,00 mm, as quais, embora finas, são mais grossas do que os outros conjuntos (CD, MS e PD). Isso provavelmente acontece pela presença da granalha, conforme demonstrado à frente. Nos demais conjuntos de amostras, esses 10 % de partículas são menores do que 0,1 mm.

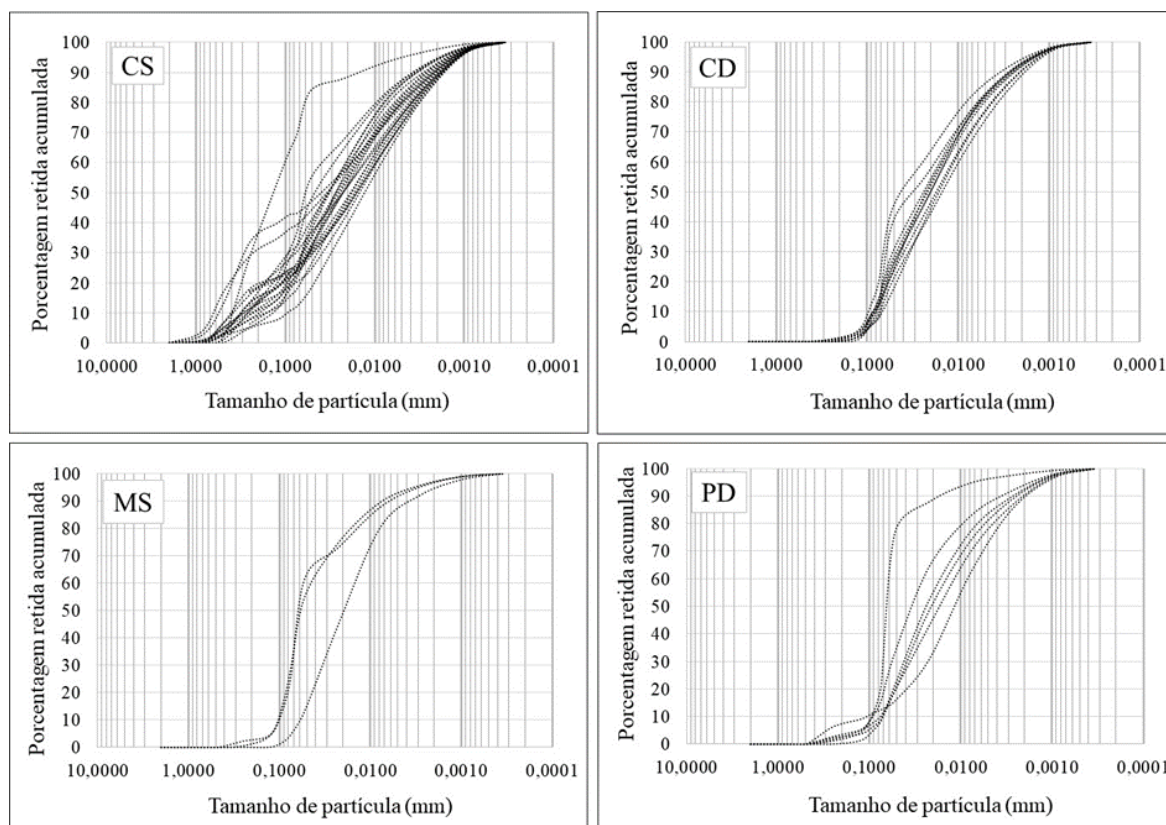


Figura 1 – Distribuição granulométrica acumulada das amostras de serragem em tear convencional (CS), tear convencional decantado (CD), multifios serragem (MS) e politriz decantado (PD).

Fonte: Autores (2025).

3.2 Composição química

Para análise da composição química do FIBRO, foram separados dois grupos: a amostra total e a fração fina da mesma ($< 0,053$ mm) (Figura 2). Com exceção do Al_2O_3 , os demais constituintes tiveram modificação significativa do conteúdo após peneiramento.

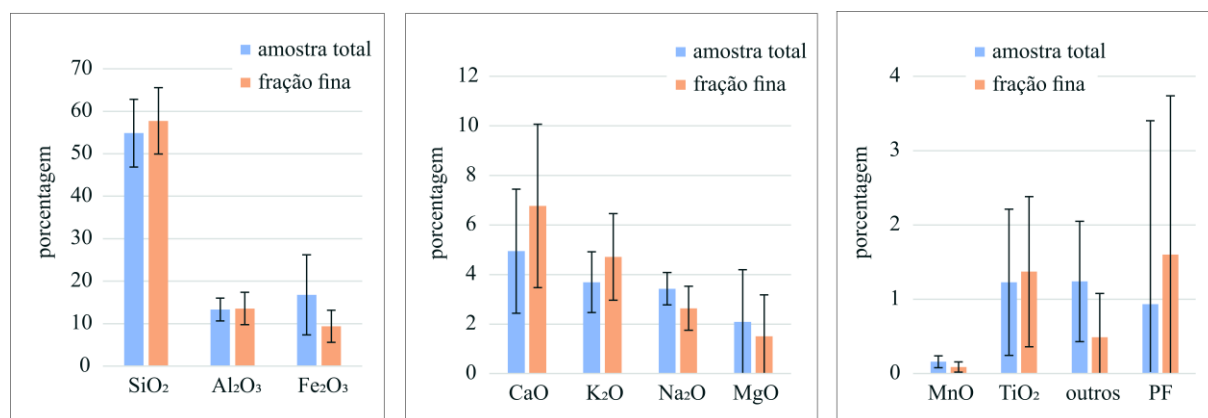


Figura 2 – Composição química do FIBRO (amostra total) e de sua fração fina ($< 0,053$ mm) (n: 36 amostras em cada grupo) (letras iguais entre os grupos indicam que não há diferença significativa com 5 % de confiança pelo Teste t de Student no caso de distribuição normal ou w de Wilcoxon em distribuição não-normal).

Fonte: Autores (2025).

Analisando-se as amostras par a par (amostra total e sua fração fina), foi calculada a taxa percentual, em média, das perdas ou ganhos de cada elemento na fração fina, após a separação granulométrica (Figura 3). Houve aumento na perda ao fogo (PF) em mais de 80 %, bem como na porcentagem de CaO, presente na cal e no carbonato dos mármore, que aumentou em mais de 40 % na fração fina. O K₂O aumentou em aproximadamente 25 % na fração fina, além do TiO₂, em aproximadamente 28 %. O SiO₂ aumentou em pouco mais de 5 % e o Al₂O₃ não apresentou diferença significativa entre as frações. Os componentes que apresentaram taxas negativas, ou seja, que tiveram diminuição de sua porcentagem na fração fina, foram o Fe₂O₃, Na₂O, MnO e MgO. O Fe₂O₃, com diminuição de quase 20 % na fração fina decorre, provavelmente, da retenção de partículas de granalha pelo peneiramento, o que pode ser algo desejável quando se pretende a reutilização do FIBRO. O mesmo ocorre com o Na₂O e MnO, que reduziram o seu teor entre cerca de 20 e 30 % na fração fina, bem como ao MgO, que diminuiu em cerca de 58 % na fração fina.

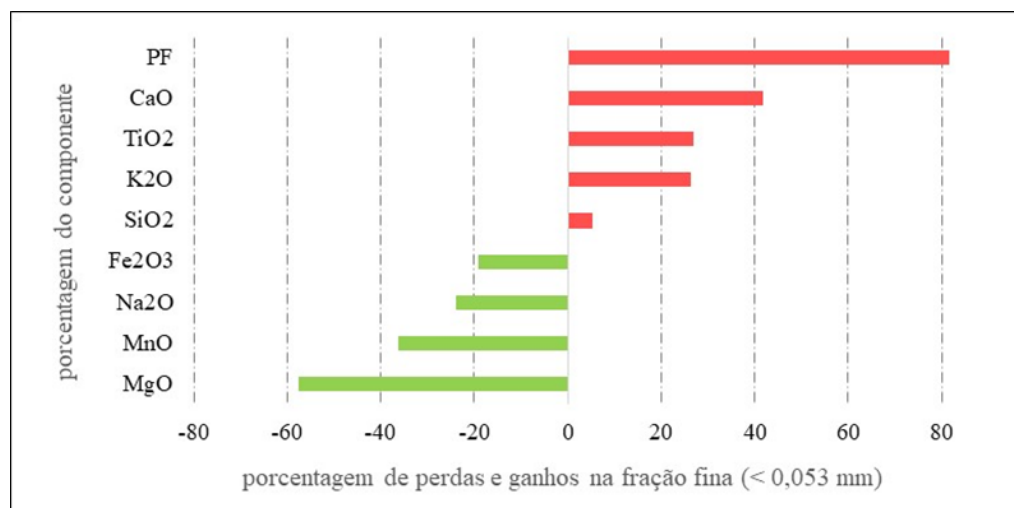


Figura 3 – Variação, em porcentagem, da composição química da fração fina (< 0,053 mm) do FIBRO em relação à amostra total. As barras em vermelho indicam a média de ganho em determinado constituinte e, em verde, a perda do constituinte na fração fina.

Fonte: Autores (2025).

3.3 Composição mineralógica

A composição mineralógica foi analisada de duas formas: as frações grossas (0,250 e 0,090 mm) foram descritas sob lupa com aumento de 40 x e a fração fina (< 0,053 mm) foi analisada por difração de raios-X (DRX).

A amostra oriunda do processo de serragem realizado em tear convencional (CS) (Figura 4) denota, na sua fração de 0,250 mm, elevada concentração de granalha já em estado de oxidação e com formas arredondadas devido ao desgaste pelo atrito e abrasão no processo de corte dos blocos rochosos. Ainda, em quantidades expressivas, ocorrem quartzo, feldspato, granada e biotita, todos com formas bem definidas e, em quantidade menos expressiva, aparece a muscovita. A fração de 0,090 mm possui mineralogia semelhante, mas nesse caso os fragmentos de granalha são minoritários, predominando quartzo, granada, biotita e muscovita.

As amostras coletadas no tanque de decantação, em empresas que usam o processo convencional (CD) (Figura 4), possuem coloração mais clara, pela maior quantidade de quartzo e pequena quantidade de fragmentos de granalha. Na fração de 0,250 mm, ocorrem quartzo, biotita, muscovita, pouca granalha e magnetita, o que se repete na granulometria de 0,90 mm, exceto pela granalha que está praticamente ausente.

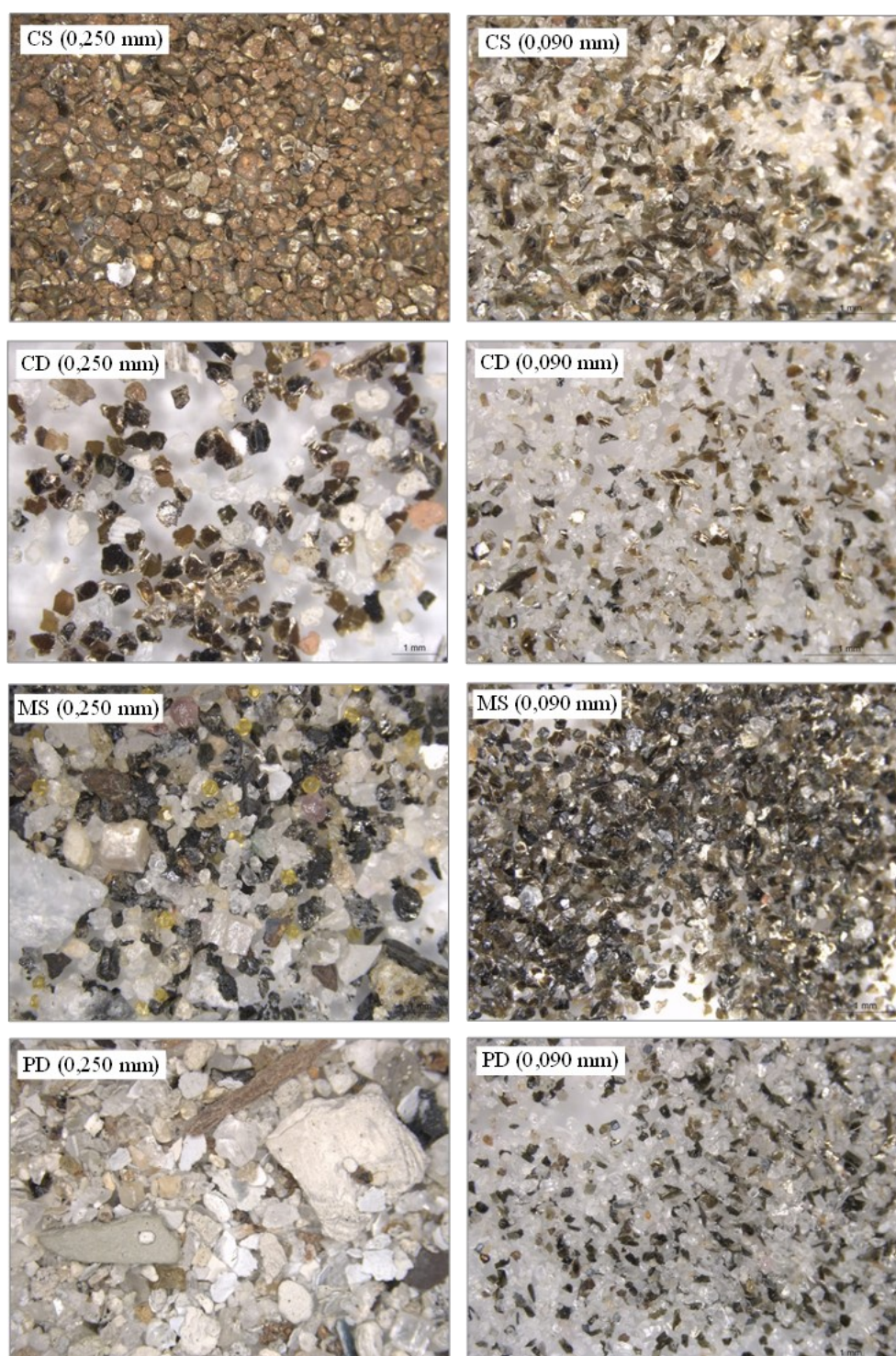


Figura 4 – Fotomicrografias das amostras do grupo convencional serragem (CS) e convencional decantado (CD) nas frações 0,250 mm e 0,090 mm; multifios serragem (MS) na fração 0,250 mm, com detalhe dos diamantes sintéticos que se desprendem dos fios, e politriz decantado (PD) também nas frações 0,250 mm e 0,090 mm.

Fonte: Autores (2025).

A amostra da lama de tear multifios referente à etapa de serragem (MS) (Figura 4) apresenta, em sua fração de 0,250 mm, elevada concentração de fragmentos de quartzo, biotita, granada e feldspato, além da presença de magnetita que se destaca pelo brilho característico e atração por ímã. É notável a presença de diamante sintético (proveni-

ente do fio diamantado), com coloração amarela e facetas preservadas (Figura 5a). Na fração 0,090 mm também há magnetita, e o quartzo ainda é presente, além de granada e biotita.

Na amostra coletada no resíduo da politriz (PD) (Figura 4), na fração de 0,250 mm, a mineralogia é composta por feldspatos arredondados a angulosos, e grande quantidade de muscovita e biotita. O quartzo apresenta partes mais alaranjadas, mostrando possível oxidação. Além dos materiais provindos da rocha, essa fração apresenta sujidades, como pedaços de papelão, madeira e plástico (Figura 5b). A fração de 0,090 mm é constituída por magnetita, quartzo, feldspato, biotita e muscovita.

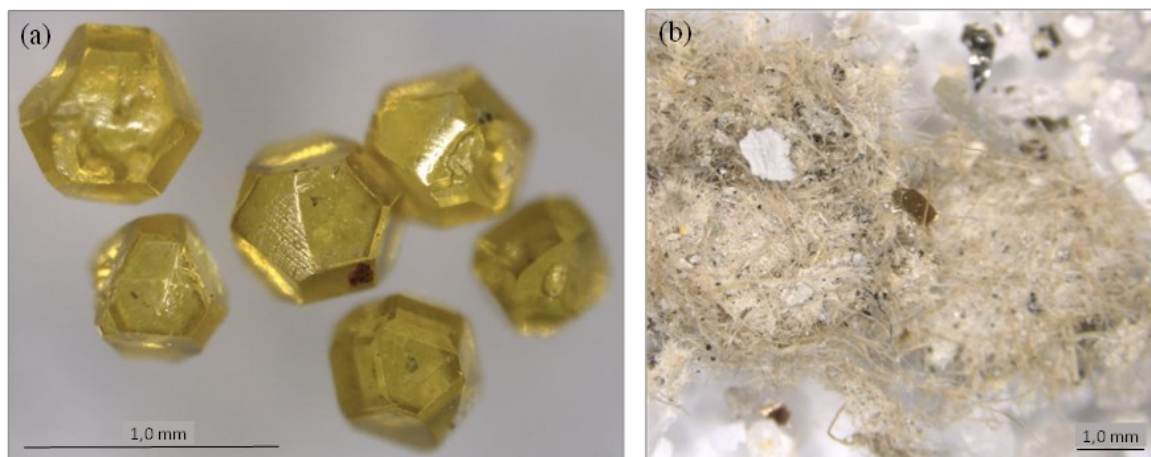


Figura 5 – Fotomicrografias (a) dos diamantes sintéticos presentes na fração 0,250 mm das amostras MS (serragem em tear multifios) e (b) exemplo de sujidades encontradas na fração 0,250 mm da amostra PD (polimento).

Fonte: Autores (2025).

A análise da fração fina ($< 0,053$ mm) por DRX (Figura 6) mostra mineralogia similar entre as amostras, compostas por: quartzo - Qtz (SiO_2); muscovita - Mus [$\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{AlO}_{10})(\text{OH}, \text{F})_2$]; feldspato - Fdl [(K, Na Ca) (Si, Al) $_4\text{O}_8$], englobando os potássicos e sódico-cálcicos; biotita - Bta [$\text{K}(\text{Mg}, \text{Fe})_3[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH}, \text{F})_2/\text{K}(\text{Mg}, \text{Fe})_3(\text{Al}, \text{Fe})\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH}, \text{F})_2$ e, em algumas frações e amostras específicas, granada - Gra [(Ca, Mg, Fe, Mn) $_3(\text{Al}, \text{Fe}, \text{Mn}, \text{Cr}, \text{Ti})_2(\text{SiO}_4)_3$]; cordierita - Crd [$\text{Mg}_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$ ou $(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$]; piroxênio - Pxn, com a fórmula geral representada por XYZ_2O_6 onde X = Mg, Fe, Ca ou Na, Y = Mg, Fe, Fe_3 ou Al e Z = Si com alguma substituição por Al; ilmenita - Imt [FeTiO_3] e horblenda - Hbl [$\text{Ca}_2(\text{Mg}, \text{Fe})_4\text{Al}(\text{Si}_7\text{AlO}_{22})(\text{OH})_2$], pertencente ao grupo dos anfibólios.

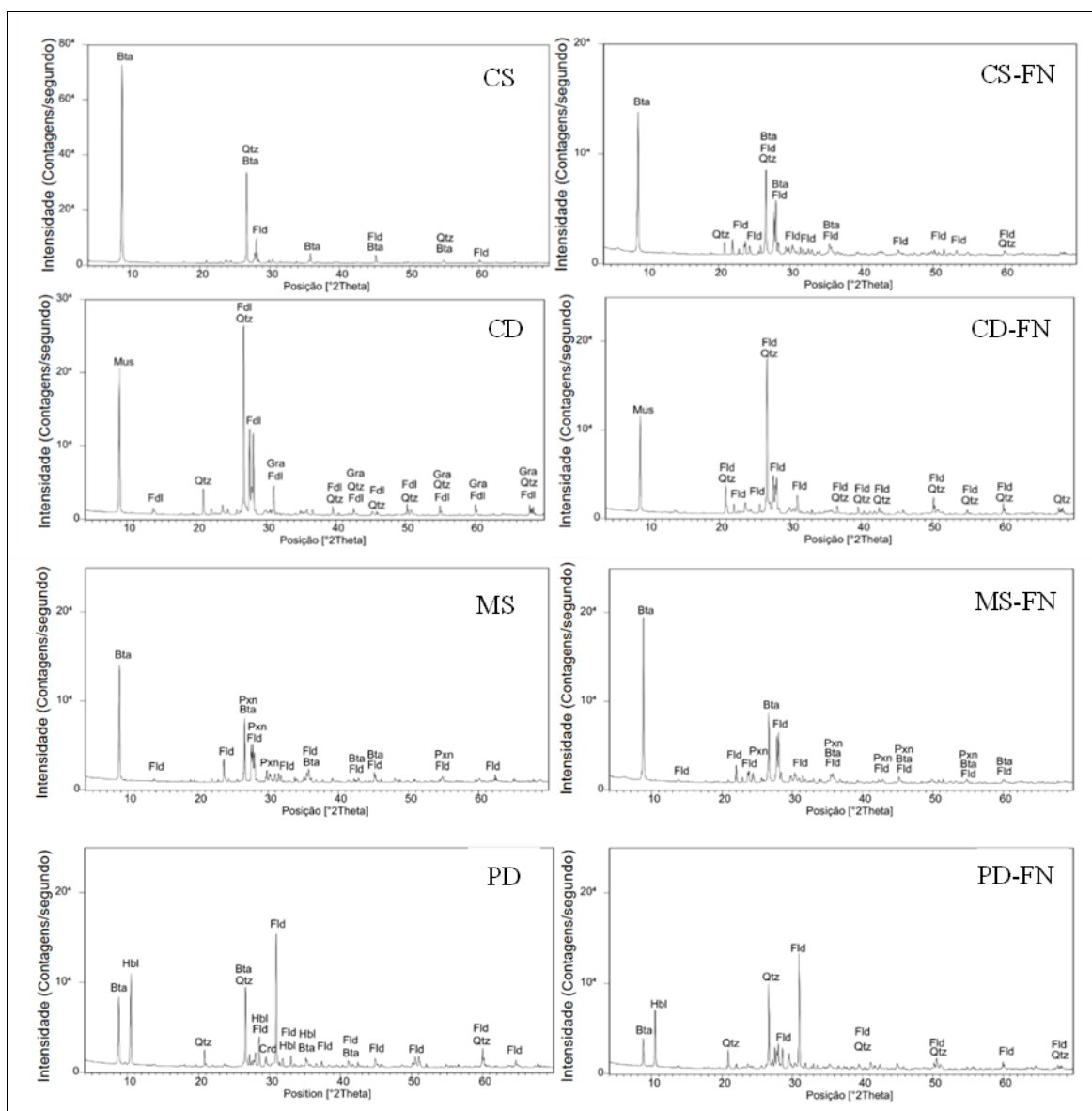


Figura 6 – Difratogramas das amostras de FIBRO e de sua fração fina (< 0,053 mm). (CS: convencional serragem e CS-FN: idem fração fina; CD: convencional decantado e CD-FN: idem fração fina; MS: multifios serragem e MS-FN: idem fração fina; PD: politriz decantado e PD-FN: idem fração fina (ver significado das siglas referentes aos picos dos minerais no texto, junto às respectivas fórmulas químicas).

Fonte: Autores (2025).

A mineralogia não varia de forma significativa em função do tamanho de partícula (Figura 6). Nas amostras de serragem em tear convencional (CS) e em suas frações finas (CS-FN), ocorrem quartzo, biotita e feldspato. Na amostra decantada do tear convencional (CD) há muscovita, granada, quartzo e feldspato e, na fração fina (CD-FN), a mineralogia se repete, exceto pela granada que não ocorre nessa fração. Nas amostras do processo de serragem em tear multifios (MS e MS-FN), os minerais presentes são feldspato, biotita e piroxênio. Na amostra decantada do processo de polimento (PD), aparecem biotita, hornblenda, quartzo, feldspato e cordierita, enquanto em sua fração fina (PD-FN) a mineralogia é a mesma, mas não há cordierita. Ou seja, os minerais comumente presentes em rochas ígneas (quartzo, feldspato, biotita e, secundariamente, piroxênio e hornblenda) ocorrem em todas as frações analisadas, enquanto os minerais acessórios (granada e cordierita) não aparecem na fração mais fina. Destaca-se que esses minerais, além de estarem presentes em menor quantidade nas rochas, são mais resistentes e por isso podem não ter sido cominuídos pelo processo de beneficiamento, permanecendo nas frações mais grossas.

4. Discussão

Esse trabalho apresenta a análise de diferentes frações granulométricas do FIBRO buscando direcionar a aplicabilidade e uso do resíduo gerado, tendo em vista que a literatura já aponta alguns caminhos viáveis de aplicação desses materiais, desde que atendam às normas técnicas de cada setor ou indústria de base.

A separação de uma fração fina, composta por grãos menores do que 0,053 mm, acarretou o aumento relativo de determinados constituintes (principalmente PF e CaO) e diminuição de outros (como Fe_2O_3 , Na_2O e MgO), o que pode trazer implicações para um ou outro uso pretendido. Uma possível explicação para o fato está na solubilização de alguns constituintes (que atribuem maior PF, além do Ca e K, elementos de alta solubilidade em água). Como a separação granulométrica foi feita por via úmida, os constituintes mais solúveis se concentraram na fração fina, que foi separada por decantação. Por outro lado, os minerais mais resistentes, além da gralha de ferro, tendem a ficar retidos na fração mais grossa.

Um ponto importante a ser destacado é a possibilidade de aproveitamento dos diamantes sintéticos presentes no resíduo de teares diamantados, tendo em vista os custos de fabricação desse insumo e conforme vem sendo proposto em alguns trabalhos (PONCIANO *et al.*, 2024). Os cristais que se soltam do fio diamantado durante a serragem de blocos são agregados à lama e apresentam suas características bem preservadas, sendo possível portanto seu aproveitamento de forma facilitada após o fracionamento granulométrico. Por outro lado, deve-se atentar para a presença de sujidades, que devem ser evitadas quando se pretende transformar resíduos em matéria-prima, pois o controle de qualidade de uma matéria-prima caminha ao lado do seu valor agregado.

Com relação ao uso em cerâmica, alguns autores (CABRAL *et al.*, 2019) relatam que a granulometria fina e o elevado teor de álcalis em determinadas argilas elevam a resistência mecânica e diminui a absorção de água do produto cerâmico. Essas propriedades são encontradas no FIBRO, o que é corroborado por vários estudos que testaram seu uso como agregado às argilas convencionais (e.g. SOUZA *et al.*, 2010; EL-MAGHARABY *et al.*, 2011; PRADO *et al.*, 2012; RODRIGUES *et al.*, 2012; TAGUCHI *et al.*, 2014; REIS *et al.*, 2015). Contudo, a composição do resíduo pode interferir nas propriedades da cerâmica. Resíduos onde os teores de carbonato são mais altos e, conseqüentemente, a PF é mais elevada, produzem peças cerâmicas com maior absorção de água e menor densidade aparente (PRADO *et al.*, 2023). A fração fina das amostras aqui estudadas teve a perda ao fogo (PF) aumentada com relação à amostra total e, como consequência, a fração mais grossa apresentará menor PF. Importante ressaltar que a granulometria da amostra total já é fina o suficiente para esse tipo de uso, não inviabilizando, portanto, o fracionamento granulométrico prévio para a redução da PF. Na fração grossa, o teor de Na aumentou em cerca de 20 %, sendo este um elemento do grupo dos alcalinos, que são benéficos a esse tipo de uso conforme relatado acima. No sentido oposto, o Fe ficou mais elevado na fração grossa, principalmente no conjunto CS pela presença da gralha de aço. Esse elemento pode ter um efeito negativo na cerâmica pois pode causar escurecimento das peças e aparecimento de manchas.

Resíduos com elevado teor de CaO, SiO_2 , MgO e Al_2O_3 podem tornar-se possíveis matérias-primas para produção de materiais vítreos, tendo em vista que o SiO_2 auxilia na formação das redes vítreas e o Al_2O_3 atua como formador da rede (RODRIGUES *et al.*, 2011). O CaO e o MgO atuam como modificadores e com a função de romper estruturas vítreas. Porém, o uso em vidrados é o mais restritivo para o teor de Fe, indicando necessidade de triagem para permitir o aproveitamento neste tipo de produto (MOREIRA *et al.*, 2021). Resíduos provenientes de tear multifios, principalmente da serragem de quartzitos, agregados com materiais ricos em Ca, podem ser interessantes para esse tipo de uso. É importante lembrar, contudo, que a presença de Fe afeta a coloração do vidro, o que pode ser, ou não, um efeito indesejado (RODRIGUES *et al.*, 2011). Salienta-se também que a perda de cerca de 58 % de MgO na fração mais fina do FIBRO, conforme mostram os dados aqui apresentados, prejudicaria a potencialidade de uso em materiais vítreos, de acordo com a literatura já citada.

Moreira *et al.* (2021) mostraram, a partir da compilação de dados de vários trabalhos publicados, que o uso de FIBRO em materiais como concreto, cimento, argamassa e tijolos são os menos restritivos quanto à composição química, ou seja, o uso desses resíduos é viável mesmo com ampla variação dos teores da maioria de seus componentes. Porém, o teor de MgO é mais restritivo, pois este componente, ao ser hidratado, pode se expandir e gerar porosidade em uma estrutura rígida de concreto (SALOMÃO & PANDOLFELLI, 2008). Assim, a segregação granulométrica aqui apresentada favorece esse tipo de uso, visto que há redução em quase 60 % dos teores de Mg na fração fina.

Alguns trabalhos (e.g. NUNES *et al.*, 2014; MACHADO *et al.*, 2016; NEVES *et al.*, 2021) indicam a possibilidade de uso desses resíduos no processo de rochagem, em função dos macronutrientes como o Ca, Mg e K neles contidos. Por outro lado, Duarte *et al.* (2021) apontam para um possível problema relativo ao Na que, em excesso no solo, pode ser prejudicial ao crescimento das plantas, a depender do tipo de solo e de algumas características ambientais. Os dados aqui apresentados mostram considerável perda de Na na fração fina, chegando a mais de 23 % comparativamente à amostra total, sendo assim a seleção granulométrica pode favorecer a obtenção de

materiais direcionados ao uso em rochagem. O mesmo pode ser dito com relação ao excesso de Fe, que, muitas vezes atrelado a outros elementos como o Mn, pode causar toxicidade no solo (DUARTE *et al.*, 2021).

Ainda no ramo da agricultura, alguns estudos (e.g. RAYMUNDO *et al.*, 2013) evidenciam a aplicabilidade de certos tipos de resíduo de rochas ornamentais como corretivo de solos, processo conhecido como calagem, voltado à diminuição da acidez do solo. Nesse quesito, a fração fina do FIBRO, enriquecida em Ca e carbonatos (refletidos na PF), torna-se um material com grande potencial para esse tipo de uso.

5. Conclusões

O aprimoramento das características do FIBRO descartado pode contribuir com a adequabilidade do material para usos específicos. A comparação entre a composição química da amostra total e sua fração fina mostrou que há enriquecimento de alguns elementos e perda de outros em cada fração granulométrica. Na fração fina ocorreu enriquecimento considerável em PF, CaO, K₂O e TiO₂, acompanhado pela perda de MgO, MnO, Na₂O e Fe₂O₃.

A expressiva quantidade de diamantes sintéticos encontrados em frações específicas de algumas amostras após o fracionamento granulométrico aponta para a viabilidade de direcionar estes materiais para separação e posterior aproveitamento, gerando assim economia no consumo deste tipo de insumo. Por outro lado, deve-se atentar para a presença de sujidades no FIBRO, pois a geração de matéria-prima com valor agregado deverá passar por um rigoroso controle de qualidade.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPES (Fundação de Apoio à Pesquisa e Inovação no Espírito Santo) pelo financiamento da pesquisa (Processo 84322853) e ao IFES (Instituto Federal do Espírito Santo) de Nova Venécia (ES) pelo recurso para tradução do artigo. Agradecemos também aos seguintes laboratórios da UFES: Laboratório de Sedimentologia do Departamento de Oceanografia e Ecologia (CCHN/UFES), Laboratório de Imageamento Avançado do Departamento de Ciências Biológicas (CCHN/UFES) e Laboratório de Engenharia Química do Departamento de Engenharia Rural (CCA/UFES).

Referências

- Almada, B. S.; Melo, L. S.; Silva, G. J. B.; Santos, W. J.; Aguilar, M. T. P. Effect of the waste ornamental rocks on the hydration and life cycle of Portland cement composites. *Construction and Building Materials*, v. 395, 132353, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132353>
- Amaral, L. F.; Carvalho, J. P. R. G.; Silva, B. M.; Delaqua, G. C. G.; Monteiro, S. N.; Vieira, C. M. F. Development of ceramic paver with ornamental rock waste. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 8, n. 1, 599-608, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.05.009>
- Azevedo, A. R. G.; Marvila, M. T.; Barroso, L. S.; Zanelato, E. B.; Alexandre, J.; Xavier, G. C.; Monteiro, S. N. Effect of granite residue incorporation on the behavior of mortars. *Materials*, v. 12, n. 9, 1449-1163, 2019. <https://doi.org/10.3390/ma12091449>
- Barreto, L. S. S.; Ghisi, E.; Godoi, C.; Oliveira, F. J. S. Reuse of ornamental rock solid waste for stabilization and solidification of galvanic solid waste: optimization for sustainable waste management strategy. *Journal of Cleaner Production*, v. 275, 122996, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122996>
- Cabral Jr., M.; Azevedo, P. B. M.; Cuchierato, G.; Motta, J. F. M. Estudo estratégico da cadeia produtiva da indústria cerâmica no Estado de São Paulo: parte I – introdução e a indústria de cerâmica vermelha. *Cerâmica Industrial*, v. 24, n. 1, 20-34, 2019. <http://dx.doi.org/10.4322/cerind.2019.003>
- Duarte, E. B.; Nascimento, A. P. S.; Gandine, S. M. S.; Carvalho, J. R.; Burak, D. L.; Neves, M. A. Liberação de potássio e sódio a partir de resíduos do beneficiamento de rochas ornamentais. *Pesquisas em Geociências*, v. 48, n. 1, e101373, 2021.
- El-Maghraby, H. F.; El-Omla, M. M.; Bondioli, F.; Naga, S. M. Granite as flux in stoneware tile manufacturing. *Journal of the European Ceramic Society*, v. 31, 2057-2063, 2011.

- Espírito Santo. Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos – IEMA. *Instrução Normativa nº 013-N de 22 de agosto de 2023*. Diário Oficial dos Poderes do Estado do Espírito Santo, quarta-feira, 23 de agosto de 2023, p. 39.
- Espírito Santo. Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos – IEMA. *Instrução Normativa nº 11, de 11 de outubro de 2016*. Diário Oficial dos Poderes do Estado do Espírito Santo, terça-feira, 18 de outubro de 2016, p. 51.
- Gomes, V. R.; Babisk, M. P.; Vieira, C. M. F.; Sampaio, J. A.; Vidal, F. W. H.; Gadioli, M. C. B. Ornamental stone wastes as an alternate raw material for soda-lime glass manufacturing. *Materials Letters*, v. 269, 127579, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.127579>
- Karaca, Z.; Pekin, A.; Deliormanli, A. H. Classification of dimension stone wastes. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 19, n. 6, 2354–2362, 2012. <https://doi.org/10.1007/s11356-012-0745-z>
- Luodes, H.; Kauppila, P. M.; Luodes, N.; Aatos, S.; Kallioinen, J.; Luukkanen, S.; Aalto, J. Characteristics and the environmental acceptability of the natural stone quarrying waste rocks. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, v. 71, n. 2, 257–261, 2011. <https://doi.org/10.1007/s10064-011-0398-z>
- Machado, R. V.; Andrade, F. V.; Passos, R. R.; Ribeiro, R. C. C.; Mendonça, E. S.; Mesquita, L. F. Characterization of ornamental rock residue and potassium liberation via organic acid application. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 40, e0150153, 2016. <https://doi.org/10.1590/18069657rbcS20150153>
- Mittri, S. H. M.; Degen, M. K.; Vieira, G. L.; Vazzoler, J. S.; Rodrigues, L. H. C. H. Análise da caracterização pozo-lânica do resíduo de rochas ornamentais tratado termicamente e seu efeito nas propriedades mecânicas de concretos. *Revista Ibracon de Estruturas e Materiais*, v. 11, n. 6, 1186-1207, 2018. <https://doi.org/10.5016/geociencias.v40i02.15585>
- Moreira, B. C.; Neves, M. A.; Pinheiro, M. M.; Nascimento, W. A. R.; Barbosa, J. L. B.; Horn, A. H. Depósitos de resíduos de rochas ornamentais: composição, dimensionamento e possíveis usos no setor de construção civil. *Geociências*, v. 40, n. 2, 525-538, 2021. <https://doi.org/10.5016/geociencias.v40i02.15585>
- Neves, M. A.; Prado, A. C. A.; Marques, R. A.; Fonseca, A. B.; Machado, M. E. S. Lama de beneficiamento de rochas ornamentais processadas no Espírito Santo: composição e aproveitamento. *Geociências*, v. 40, n. 1, 123-136, 2021. <https://doi.org/10.5016/geociencias.v40i1.15020>
- Neves, M. A.; Taguchi, S. P.; Silva, D. R.; Vieira, F. T. Marble waste as attenuator of acidic effluent. *Geologia USP*, v. 19, n. 1, 33-42, 2019. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v19-134247>
- Nunes, J. M. G.; Kautzmann, R. M.; Oliveira, C. Evaluation of the natural fertilizing potential of basalt dust wastes from the mining district of Nova Prata (Brazil). *Journal of Cleaner Production*, v. 84, 649–656, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.04.032>
- Pérez-Sirvent, C.; García-Lorenzo, M. L.; Martínez-Sánchez, M. J.; Navarro, M. C.; Marimón, J.; Bech, J. Metal-contaminated soil remediation by using sludges of the marble industry: toxicological evaluation. *Environment International*, v. 33, 502-504, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2006.11.003>
- Ponciano, V. M.; Bahiense, A. V.; Almeida, P. F.; Sopeletto, M. V. S.; Sagrillo, V. P. D.; Oliveira, J. R. Recuperação de diamantes sintéticos dos finos do beneficiamento de rochas ornamentais. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, v. 18, n. 2, 1-18, e07761, 2024. <https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n2-159>
- Prado, A. C. A.; Borges, S. P. T.; Neves, M. A.; Soares, R. H.; Fonseca, A. B. Use of fine wastes from dimension stone industry in the manufacture of ceramic tile. *Materials Science Forum*, v. 727-728, 703-709, 2012.
- Prado, A. C. A.; Feitosa, R. L. M.; Neves, M. A.; Taguchi, S. P. The influence of compositional variability of dimension stone residues on the properties of rustic porous ceramic tiles. *Cerâmica*, v. 69, 23-29, 2023. <https://doi.org/10.1590/0366-69132023693893382>
- Rana, A.; Kalla, P.; Verma, H. K.; Mohnot, J. K. Recycling of dimensional stone waste in concrete: a review. *Journal of Cleaner Production*, v. 135, 312–331, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.126>

- Raymundo, V.; Neves, M. A.; Cardoso, M. S. N.; Bregonci, I. S.; Lima, J. S. S.; Fonseca, A. B. Resíduos de serra-gem de mármore como corretivo da acidez de solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 17, n. 1, 47-53, 2013. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662013000100007>
- Reis, A. S.; Della-Sangrillo, V. P.; Valenzuela-Dias, F. R. Analysis of dimension stone waste addition to the clayey mass used in root tile production. *Materials Research*, v. 18, n. 2, 63-69, 2015.
- Rodrigues, D. V.; Xavier, G. C.; Saboya, F.; Maia, P. C. A.; Alexandre, J. Durabilidade de peças cerâmicas vermelhas com adição de rejeito de rocha ornamental isenta de granalha. *Cerâmica*, v. 58, 286-293, 2012.
- Rodrigues, G. F.; Alves, J. O.; Tenório, J. A. S.; Espinosa, D. C. R. Estudo de resíduos de rochas ornamentais para a produção de materiais vítreos. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, v. 8, n. 3, 203-207, 2011. <http://dx.doi.org/10.4322/tmm.2011.032>.
- Salomão, R.; Pandolfelli, V. C. Hidratação e desidratação de óxido de magnésio em concretos refratários. *Cerâmica*, v. 54, n. 330, 145-151, 2008.
- Silva, K. R.; Campos, L. F. A.; Santana, L. N. L. Use of experimental design to evaluate the effect of the incorporation of quartzite residues in ceramic mass for porcelain tile production. *Materials Research*, v. 22, n. 1, e20180388, 2019. <http://dx.doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2018-0388>
- Souza, A. J.; Pinheiro, B. C. A.; Holanda, J. N. F. Processing of floor tiles bearing ornamental rock-cutting waste. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 210, 1898-1904, 2010.
- Strzalkowski, P. Characteristics of waste generated in dimension stone processing. *Energies*, v. 14, n. 21, 7232, 2021. <https://doi.org/10.3390/en14217232>
- Taguchi, S. P.; Santos, J. C.; Gomes, T. M.; Cunha, N. A. Avaliação das propriedades tecnológicas de cerâmica vermelha incorporada com resíduo de rocha ornamental proveniente do tear de fio diamantado. *Cerâmica*, v. 60, 291-296, 2014.
- Tozsin, G.; Oztas, T.; Arol, A. I.; Kalkan, E. Changes in the chemical composition of an acidic soil treated with marble quarry and marble cutting wastes. *Chemosphere*, v. 138, 664-667, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.07.063>
- Zichella, L.; Bellopede, R.; Marini, P. Ornamental stone cutting processing and sludge production evaluation with the goal of ending waste. *Materials Proceedings*, v. 5, n. 1, 57, 2021. <https://doi.org/10.3390/materproc2021005057>
- Zichella, L.; Bellopede, R.; Spriano, S.; Marini, P. Preliminary investigations on stone cutting sludge processing for a future recovery. *Journal of Cleaner Production*, v. 178, 866-876, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.226>
- Zornoza, R.; Faz, A.; Carmona, D. M.; Acosta, J. A.; Martínez-Martínez, S.; Vreng, A. Carbon mineralization, microbial activity and metal dynamics in tailing ponds amended with pig slurry and marble waste. *Chemosphere*, v. 90, 2606-2613, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.10.107>