



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ – CAMPUS CRATEÚS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS

ISADORA EDINA BEZERRA GUERREIRO

ESTUDO E CARACTERIZAÇÃO DE UM RESÍDUO GERADO NO
PROCESSAMENTO DE GRANITO

CRATEÚS
2022

ISADORA EDINA BEZERRA GUERREIRO

ESTUDO E CARACTERIZAÇÃO DE UM RESÍDUO GERADO NO PROCESSAMENTO
DE GRANITO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Minas da Universidade Federal do Ceará – Campus Crateús, como requisito para obtenção do grau de bacharel em Engenharia de Minas.

Orientadora: Prof. Me. Tiany Guedes Cota.

CRATEÚS

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

G965e Guerreiro, Isadora Edina Bezerra.
Estudo e caracterização de um resíduo gerado no processamento de granito / Isadora Edina Bezerra
Guerreiro. – 2022.
61 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús,
Curso de Engenharia de Minas, Crateús, 2022.
Orientação: Profa. Ma. Tiany Guedes Cota .

1. Rochas Ornamentais. 2. Resíduo Fino. 3. Caracterização Tecnológica. 4. Aproveitamento. I. Título.
CDD 622

ISADORA EDINA BEZERRA GUERREIRO

ESTUDO E CARACTERIZAÇÃO DE UM RESÍDUO GERADO NO PROCESSAMENTO
DE GRANITO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Graduação em Engenharia de
Minas da Universidade Federal do Ceará –
Campus Crateús, como requisito para obtenção
do grau de bacharel em Engenharia de Minas.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Tiany Guedes Cota (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Francisco Diones Oliveira da Silva
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Me. Wollker Cunha Soares
Universidade Federal do Ceará (UFC)

À Deus.

À minha mãe Irene Bezerra e minha irmã Iara
Eloane por serem minhas maiores
incentivadoras e estarem sempre ao meu lado.

E ao meu pai Antônio Edinaldo (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

À minha mãe, por ser essa mulher inspiradora e minha maior incentivadora à vida acadêmica e não medir esforços estando ao meu lado em todos os momentos sendo meu alicerce. Sou grata pelo seu amor e dedicação que são imensuráveis.

À minha irmã, por estar comigo sendo minha melhor amiga e me apoiando e incentivando sendo essencial nos momentos mais precisos.

Ao meu pai (*in memoriam*).

À minha avó Filomena Lopes, pelo acolhimento em sua casa durante a minha jornada acadêmica e por todo suporte. E aos meus familiares, em especial meus avós Antônio Bezerra e Mariana Barroso, minhas tias e tios e meus primos.

Aos meus amigos, pelo encorajamento, torcida e por sempre expressar sentimentos motivadores.

À minha orientadora Prof. Me. Tiany Guedes Cota, pela maravilhosa orientação, paciência e dedicação. Seus ensinamentos, palavras e subsídios foram essenciais e primordiais para a construção deste trabalho.

Aos membros participantes da banca pelo tempo e pelas valiosas considerações e sugestões.

E aos meus colegas da universidade, pelo auxílio, incentivo e ensinamentos.

RESUMO

O Brasil está entre um dos maiores produtores e exportadores de rochas ornamentais e de revestimento. No entanto, a cadeia produtiva desses materiais é uma das maiores geradoras de resíduos na indústria de mineração. Os resíduos provenientes das rochas ornamentais apresentam características e propriedades similares ao material de origem. Porém, a disposição irregular destes materiais pode gerar diversos danos ao meio ambiente. Atualmente, com práticas voltadas para a preservação do meio ambiente, os resíduos podem ser aproveitados em aplicações em outros setores industriais. Nesse sentido, torna-se necessário o conhecimento das suas características e propriedades para possíveis aplicações ou para serem dispostos em aterros licenciados. Assim, o presente trabalho tem por objetivo principal realizar a caracterização de um resíduo fino gerado no processamento de granito de uma empresa localizada no estado do Ceará. Com este intuito, foram realizados ensaios de microscopia eletrônica de varredura, análise macroscópica da rocha, massa específica, umidade, análise granulométrica e análise termogravimétrica. A rocha de origem do resíduo trata-se de um monzogranito, sendo observado no resíduo a presença de minerais como zircão e albita. A massa específica da amostra de resíduo foi de $2,52 \text{ g/cm}^3$ e está próxima ao de minerais de composição da rocha. A granulometria da amostra é constituída de um material fino, com 90% do material menor que $90\mu\text{m}$, com baixa umidade e com comportamento térmico estável. É possível inferir o uso do resíduo fino de granito para a produção de materiais como cerâmica vermelha, blocos de concreto, cerâmica de revestimento e na agricultura. Contudo, estes materiais precisariam ser submetidos a estudos tecnológicos específicos para comprovar a viabilidade do uso desses produtos.

Palavras-chave: rocha ornamental; Ceará; aproveitamento.

ABSTRACT

Brazil is among one of the largest producers and exporters of ornamental and cladding stones. However, the production chain of these materials is one of the biggest generators of waste in the mining industry. Residues from ornamental rocks have characteristics and properties similar to the source material. However, the irregular disposition of these materials can generate several damages to the environment. Currently, with practices aimed at preserving the environment, waste can be used in applications in other industrial sectors. In this sense, it is necessary to know their characteristics and properties for possible applications or to be disposed of in licensed landfills. Thus, the main objective of this work is to characterize a fine residue generated in the granite processing of a company located in the state of Ceará. For this purpose, tests were carried out by scanning electron microscopy, macroscopic analysis of the rock, specific mass, moisture, granulometric analysis and thermogravimetric analysis. The rock of origin of the residue is a monzogranite, being observed in the residue the presence of minerals such as zircon and albite. The specific mass of the residue sample was 2.52 g/cm³ and is close to that of rock composition minerals. The granulometry rocha ornamental; Ceará; aproveitamento.of the sample is constituted of a fine material, with 90% of the material smaller than 90µm, with low humidity and with stable thermal behavior. It is possible to infer the use of fine granite residue for the production of materials such as red ceramics, concrete blocks, cladding ceramics and in agriculture. However, these materials would need to be subjected to specific technological studies to prove the feasibility of using these products.

Keywords: ornamental rock; Ceará; use.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Aplicações das rochas ornamentais: (a) aplicação em revestimento, piso de shopping; (b) arte funerária; (c) aplicação em pavimentação, revestimento com granito bruto.....	17
Figura 2	– Lavra por bancadas altas: (a) abertura com geometria em “L”, (b) sequenciamento lateral; (c) blocos extraídos.....	24
Figura 3	– Lavra por painéis verticais.....	25
Figura 4	– Desdobramento de blocos em chapas utilizando multifio.....	27
Figura 5	– Técnicas de beneficiamento secundário: (a) equipamento de escovação; (b) flameamento em chapas de rochas ornamentais.....	28
Figura 6	– Resíduos gerados durante a lavra e beneficiamento: (a) blocos não aproveitáveis; (b) resíduos da serraria e polimento – chapas e ladrilhos danificados; (c) chapa inutilizável; (d) e (e) resíduo fino.....	29
Figura 7	– Fluxograma separação sólido/líquido dos resíduos provenientes do beneficiamento de rochas ornamentais.....	33
Figura 8	– Etapas metodológicas para composição da pesquisa.....	34
Figura 9	– Pilha longitudinal: (a) Homogeneização; (b) Quarteamento; (c) Formação da amostra.....	35
Figura 10	– Pilha cônica: (a) Homogeneização; (b) Pilha cônica; (c) Quarteamento; (d) Formação das alíquotas.....	36
Figura 11	– (a) Equipamento de microscopia de varredura; (b) Amostra acoplada ao equipamento para análise.....	37
Figura 12	– Imagem ilustrativa das pesagens para determinação da massa específica real: (a) Picnômetro vazio; (b) Picnômetro + amostra; (c) Picnômetro + água + amostra; (d) Picnômetro + água.....	38
Figura 13	– Imagem ilustrativa para determinação da massa específica aparente: (a) Amostra na proveta de 100 ml; (b) Pesagem da amostra.....	39

Figura 14 – Sedimentação: (a) 70 g do material passante na peneira de 2 mm; (b) Defloculante adicionado na amostra; (c) Copo de dispersão; (d) Leituras com o densímetro.....	40
Figura 15 – Conjunto de peneiras.....	40
Figura 16 – Equipamento utilizado para análise termogravimétrica: (a) vista geral e (b) vista do porta amostra.....	41
Figura 17 – Morfologia das partículas de resíduo de granito.....	42
Figura 18 – Morfologia das partículas de resíduo de granito evidenciando o mineral albita.....	44
Figura 19 – Monzogranito.....	45
Figura 20 – Diagrama QAP.....	46
Figura 21 – Material retido no peneiramento a fino.....	49

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Exportações mensais das rochas ornamentais anos de 2019 e 2020.....	19
Gráfico 2 – Rochas ornamentais exportadas em 2020.....	20
Gráfico 3 – Exportações mês a mês das rochas ornamentais no Ceará. FOB (US\$).....	21
Gráfico 4 – Principais produtos exportados no estado do Ceará no ano de 2021.....	23
Gráfico 5 – Elementos químicos detectados no mapeamento da área 1.....	43
Gráfico 6 – Elementos químicos determinados no ponto 01.....	43
Gráfico 7 – Elementos químicos determinados no ponto 02.....	44
Gráfico 8 – Curva de distribuição do tamanho das partículas.....	48
Gráfico 9 – Análise termogravimétrica do resíduo de granito.....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Perfil da produção brasileira por tipo de rocha.....	18
Tabela 2	– Exportações mensais das rochas ornamentais nos anos de 2019 e 2020 em US\$ milhões.....	19
Tabela 3	– Reservas de rochas ornamentais e de revestimentos do estado do Ceará aprovadas pela ANM.....	20
Tabela 4	– Importações mês a mês das rochas ornamentais no estado do Ceará. FOB US\$.....	22
Tabela 5	– Produção de rochas e rejeitos nos anos de 2014-2020 (valores em 1.000t)...	30
Tabela 6	– Composição química detectados no mapeamento da área 1 e nos pontos 1 e 2 da amostra do resíduo de granito.....	43
Tabela 7	– Tamanho das partículas.....	46
Tabela 8	– Teor de umidade.....	47
Tabela 9	– Resultados do ensaio de massa específica real com o picnômetro.....	47
Tabela 10	– Resultados do ensaio de massa específica aparente.....	47
Tabela 11	– Dados granulométricos.....	48
Tabela 12	– Dados peneiramento a fino.....	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABIROCHAS	Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais
ANM	Agência Nacional de Mineração
CETEM	Centro de Tecnologia Mineral
COMEX	Comércio Exterior
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
EDS	Energia Dispersiva de Raio X
FOB	<i>Free On Board</i>
FRX	Fluorescência de Raio X
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
NM	Norma Mercosul
UFC	Universidade Federal do Ceará

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.2	Objetivos	15
1.2.1	<i>Objetivo geral.....</i>	15
1.2.2	<i>Objetivo específico</i>	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
2.1	Rochas ornamentais.....	16
2.1.1	<i>Definição e uso.....</i>	16
2.1.2	<i>Produção de rochas ornamentais.....</i>	17
2.2	Lavra e beneficiamento de rochas ornamentais.....	23
2.3	Resíduos gerados na produção de rochas ornamentais.....	28
2.4	Aproveitamento de resíduos de rochas ornamentais	31
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	34
3.1	Amostragem.....	35
3.2	Microscopia eletrônica de Varredura – MEV.....	36
3.3	Análise macroscópica da rocha.....	37
3.4	Umidade.....	37
3.5	Massa específica real e aparente.....	38
3.6	Análise granulométrica.....	39
3.7	Análise termogravimétrica.....	41
3.8	Estudo das principais aplicações.....	41
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	42
4.1	Microscopia eletrônica de Varredura – MEV.....	42
4.2	Análise macroscópica da rocha.....	45
4.3	Umidade.....	46
4.4	Massa específica real e aparente.....	47
4.5	Análise granulométrica.....	48
4.6	Análise termogravimétrica.....	50
4.7	Estudo das principais aplicações.....	50
4.7.1	<i>Cerâmica vermelha.....</i>	50
4.7.2	<i>Blocos de concreto.....</i>	51
4.7.3	<i>Cerâmica de revestimento.....</i>	53
4.7.4	<i>Agricultura.....</i>	54
5	CONCLUSÃO.....	57
	REFERÊNCIAS.....	58

1 INTRODUÇÃO

As rochas ornamentais são materiais de ocorrência natural com características e propriedades que podem designá-las para utilização na construção civil, arte estatutuária e funerária. Estas devem apresentar resistência para diferentes processos de beneficiamento, tornando-as ideais para aplicações em pisos, fachadas, paredes, bancadas, balcões, mesas, entre outras. Além da resistência, o material deve apresentar beleza estética, ser homogêneo e características ideais para cada aplicação. As rochas predominantes neste setor são os mármore e os granitos, contudo há um aumento na exploração de quartzitos, ardósias, basaltos e conglomerados (MATTOS, 2000; ALENCAR, 2013).

O Brasil está inserido em um perfil litológico propício para a ocorrência desses materiais, sendo um dos maiores produtores de rochas ornamentais e de revestimento, ocupando o 4º lugar no ranking mundial de produção e o 6º em exportações. No ano de 2020, foram produzidas cerca de 9 milhões de toneladas, sendo os principais produtores os estados de Espírito Santo, Minas Gerais e Ceará, nessa ordem. O Ceará é um produtor promissor, com crescimento acentuado na produção de rochas ornamentais, sendo produzidas cerca de 1 milhão de toneladas no ano de 2020, destacando os principais municípios com maior taxa de exportação Caucaia, Santa Quitéria, Uruoca, Fortaleza e Sobral (BRASIL, 2019; CHIODI FILHO, 2021; COMEXSTAT, 2021).

Da Silva (2011) e Silveira (2014) destacam que a cadeia produtiva das rochas ornamentais é composta por três etapas principais. A extração, onde os maciços são lavrados em blocos, o beneficiamento primário, onde os blocos são cortados em chapas, e o beneficiamento secundário, onde é realizado o acabamento nas chapas ou ladrilhos para produção do produto final.

O processo de extração geralmente, acontece em lavras a céu aberto, onde os métodos mais usais no Brasil são os de bancadas e painéis verticais. Vidal (2013) e Curi (2017) ressaltam que para definição do método de lavra devem ser levados em consideração a condição geológica, a dimensão e formato do depósito e as características e propriedades da rocha. Durante a fase de lavra, normalmente, são obtidos blocos e/ou chapas, podendo ser destinados ao beneficiamento.

Durante as etapas de lavra e beneficiamento tem-se a geração de uma grande quantidade de resíduos, como por exemplo os blocos com fissuras, fragmentos e pó de rochas. O pó de rocha pode ser gerado na fase de serragem do bloco, um resíduo fino que pode estar associado a insumos como água, granelha e cal, formando uma lama. O descarte irregular

destes resíduos pode gerar degradação ao meio ambiente como poluição da água nascente, rios, riachos, lençóis freáticos, assoreamento de rios e impermeabilização do solo (MATHIELO *et al.*, 2019; SANTOS *et al.*, 2013).

Para minimizar os impactos ambientais e para maior aproveitamento dos recursos naturais, a prática de aproveitamento dos resíduos de rochas ornamentais vem sendo bastante utilizadas, por exemplo, como matéria-prima na fabricação de concreto e argamassa, cimento, cerâmica vermelha, tijolos, vidrados e rochagem (MATHIELO *et al.*, 2019; MOREIRA *et al.*, 2021). Destaca-se que devido à alta taxa de geração destes materiais, as alternativas de aproveitamento parecem ser uma forma prática e de baixo custo para utilização de resíduos que apresentam baixo valor agregado.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Realizar a caracterização de um resíduo fino gerado em uma empresa de fabricação de granito no estado do Ceará.

1.2.2 Objetivos específicos

- Realizar ensaios de microscopia eletrônica de varredura, análise macroscópica da rocha, umidade, densidade, análise granulométrica e termogravimetria;
- Realizar um levantamento e análise de trabalhos sobre o aproveitamento de finos de resíduos de granito;
- Identificar possíveis aplicações industriais para os finos de resíduos de granito.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Rochas ornamentais

2.1.1 Definição e uso

A utilização das rochas, acontece desde a antiguidade, a princípio de maneira rudimentar e com pouco conhecimento. Devido as características como resistência, beleza e qualidade, esse material ganhou destaque na construção civil, inicialmente, com funcionalidade em estruturas ou alvenaria de edificações. Atualmente, diante do avanço tecnológico no parque industrial em equipamentos de extração e beneficiamento, seu uso ampliou-se para revestimentos em pisos, paredes e fachadas, além do uso em pias ou balcões e, até mesmo, em artes estatuária e funerária (FRASCÁ, 2014).

De acordo com a NBR 15012 (2013), rocha ornamental pode ser definida como: “material pétreo natural, utilizado em revestimentos internos e externos, estruturas, elementos de composição arquitetônica, decoração, mobiliária e arte funerária”. Nesta norma, também é definido rocha para revestimento, como: “rocha ornamental submetida a diferentes graus ou tipos de beneficiamento, utilizada no revestimento de pisos, paredes e fachadas”.

Segundo Mattos (2000), as rochas ornamentais abrangem diversos tipos litológicos que podem ser extraídos em blocos ou placas, sendo importante observar algumas exigências básicas, como: apresentar beleza estética, um padrão contínuo, ou seja, devem ser homogêneas (sem manchas ou buracos que ocorram de modo irregular) e possuir características tecnológicas, índices físicos e índices de alterabilidade dentro dos padrões aceitáveis pelas normas técnicas.

A estética das rochas ornamentais é uma das características dominantes na escolha da sua utilização, sendo que, Frascá (2014), caracteriza rocha ornamental como “[...] todos os materiais rochosos aproveitados pela sua aparência estética para utilização em trabalhos artísticos, como estatuária como elemento decorativo e como materiais para construção”.

O conceito de rochas ornamentais apresenta uma pequena variação entre autores, contudo, todos destacam a resistência e a aplicabilidade. Estas rochas apresentam grupos que variam por sua composição química, tendo um maior destaque os mármore e os granitos. Os mármore são rochas carbonáticas adepts ao beneficiamento secundário, já os granitos tornam-se mais usais, pois apresentam uma maior resistência, abrangendo uma maior aplicabilidade como em pisos e fachadas (ALENCAR, 2013).

As rochas ornamentais são usadas em sua grande maioria para revestimentos externos na construção civil. Contudo, há um grupo de rochas aplicadas em revestimentos internos, conhecidas por rochas exóticas. Essas rochas apresentam uma estética diferente do padrão, devido a sua formação geológica, exibe uma estrutura heterogênea, porém, sua resistência mecânica é baixa e sua produção limitada (FRASCÁ, 2014).

Alencar (2013) destaca que as rochas ornamentais em sua grande maioria se destinam a construção civil e arte funerária, sendo que mais de 50% são remetidas a obras civis, em construções de edificações públicas e privadas, pavimentações e acabamento de praças e parques. Na arte funerária são designadas a construção de túmulos e mausoléus. Outra aplicação é a arte decorativa, que são empregadas em estátuas, peças decorativas, balcões, entre outros. A Figura 1 apresenta algumas aplicações das rochas ornamentais.

Figura 1 – Aplicações das rochas ornamentais: (a) aplicação em revestimento, piso de shopping; (b) arte funerária; (c) aplicação em pavimentação, revestimento com granito bruto



Fonte: Adaptado de Alencar (2013).

2.1.2 Produção de rochas ornamentais

A demanda das rochas ornamentais fez com que houvesse um aumento na exportação e no consumo nacional desse material. Além da modernidade na indústria dessas rochas, houve o aumento da necessidade de profissionais específicos com conhecimentos das propriedades destes materiais e do seu uso corretamente (FRASCÁ, 2014).

No cenário mundial, o Brasil tem participação com 6,4% na produção de rochas ornamentais e de revestimento, ocupando o 4º lugar no ranking mundial de produção. Aparece como 6º maior exportador mundial de rochas, sendo um importador pouco expressivo. De acordo com o Anuário Mineral Brasileiro, as reservas recuperáveis (30% das reservas medidas) são da ordem de 6 bilhões de m³ de rochas ornamentais no Brasil (BRASIL, 2019).

No Brasil há uma grande diversidade de rochas ornamentais, sendo que o grande destaque no país são os granitos, os mármore e os quartzitos maciços. De acordo com Chiodi Filho (2018), assume-se a existência de pelo menos 1.500 frentes ativas de lavra, sempre a céu aberto e quase sempre em maciços, responsáveis por mais de 1.200 variedades comerciais de rochas colocadas nos mercados interno e externo. Na Tabela 1 são apresentadas, as principais rochas encontradas no país e sua respectiva produção.

Tabela 1 – Perfil da produção brasileira por tipo de rocha

Rocha Ornamental	Produção 2020 (Mt)
Granitos e Afins	4,0
Mármore e Travertino	2,3
Ardósia	0,4
Quartzito Foliado	0,2
Quartzito Maciço	1,5
Pedra Micarena	0,2
Outros (Basalto, Pedra Cariri, Pedra Sabão, Pedra Morisca, etc.)	0,4
Total	9,0

Fonte: ABIROCHAS (2021).

As ocorrências dessas rochas estão divididas nos estados brasileiros, sendo a produção anual total de 9.000.000 toneladas. Segundo dados fornecidos pela Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais (2021), os estados do Espírito Santo, Minas Gerais e Ceará são os principais polos de lavra do Brasil, com distribuição estimada de produção no ano de 2020 de 2.800.000 t, 1.800.000 t e 1.000.000 t, respectivamente. Em relação às exportações, o Espírito Santo obteve um faturamento de US\$ 813,8 milhões sendo um dos maiores estados exportadores, seguindo-se Minas Gerais com US\$ 105,8 milhões. O estado do Ceará exportou US\$ 25,2 milhões, evidenciando sua tendência de crescimento (CHIODI FILHO, 2021).

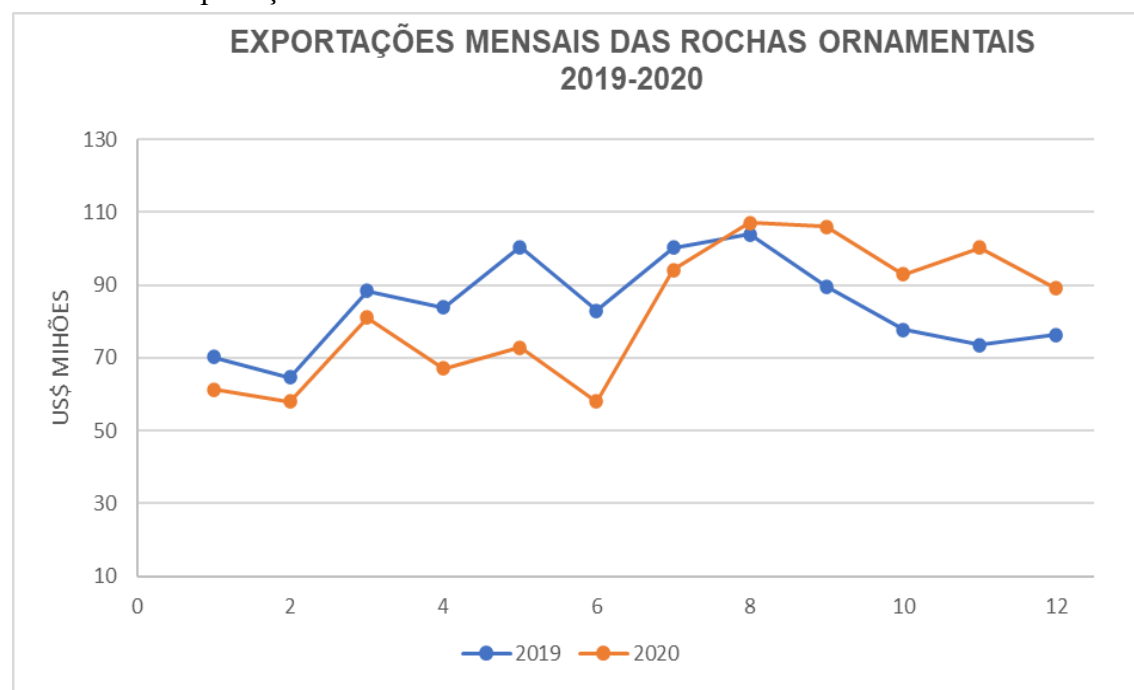
Através do balanço das exportações e importações brasileiras de rochas ornamentais em 2021, realizado pela ABIROCHAS, as exportações do ano de 2020 houve uma queda em relação ao ano de 2019, conforme exposto na Tabela 2. Alguns fatores levaram a esse recuo, eventualmente, no primeiro semestre foi devido a pandemia do COVID 19. No Gráfico 1 é possível observar o reerguimento do mercado externo e interno durante o segundo semestre de 2020. O mercado interno também houve um decréscimo, somando em US\$ 13,1 milhões e 40,0 mil toneladas, recuando em 18,5% e 14,8% nessa ordem em relação a 2019 (CHIODI FILHO, 2021).

Tabela 2 - Exportações mensais das rochas ornamentais nos anos de 2019 e 2020 em US\$ milhões.

Meses	Exportações em US\$ milhões	
	2019	2020
Janeiro	70.2	61.3
Fevereiro	64.6	58
Março	88.4	81
Abril	83.9	67
Maio	100.4	72.8
Junho	83	57.9
Julho	100.2	94.2
Agosto	103.9	107
Setembro	89.7	106
Outubro	77.7	92.9
Novembro	73.6	100.2
Dezembro	76.4	89.1

Fonte: ABIROCHAS (2021).

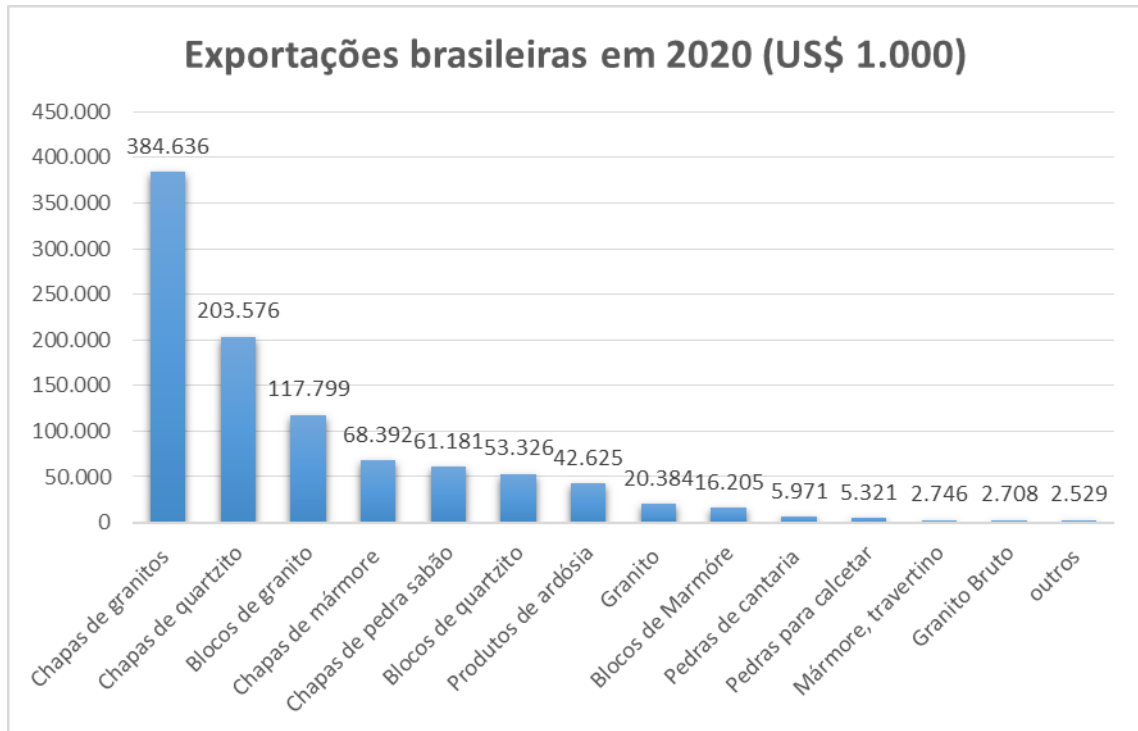
Gráfico 1 – Exportações mensais das rochas ornamentais anos de 2019 e 2020



Fonte: Adaptado ABIROCHAS (2021).

Dentre os materiais exportados os maiores volumes foram de chapas de granito, chapas e blocos de quartzito, bloco de mármore e produtos de pedra sabão e ardósia, como mostra o Gráfico 2. Com principais destinos EUA, China e Itália, obteve-se um faturamento de US\$ 621,0 milhões, US\$ 112,0 milhões e US\$ 56,7 milhões, respectivamente (CHIODI FILHO, 2021).

Gráfico 2 - Rochas ornamentais exportadas em 2020



Fonte: Adaptado ABIROCHAS (2021).

Torna-se importante destacar que o estado do Ceará contribui de forma significativa no mercado de rochas ornamentais e na indústria de construção civil, devido a geodiversidade propícia para formações rochas ricas em propriedades de interesse para esse setor. Atualmente, há uma diversidade de reservas de rochas ornamentais contidas no estado, sendo apresentado na Tabela 3 as reservas de rochas ornamentais e de revestimentos do estado do Ceará aprovadas pela ANM no ano de 2018.

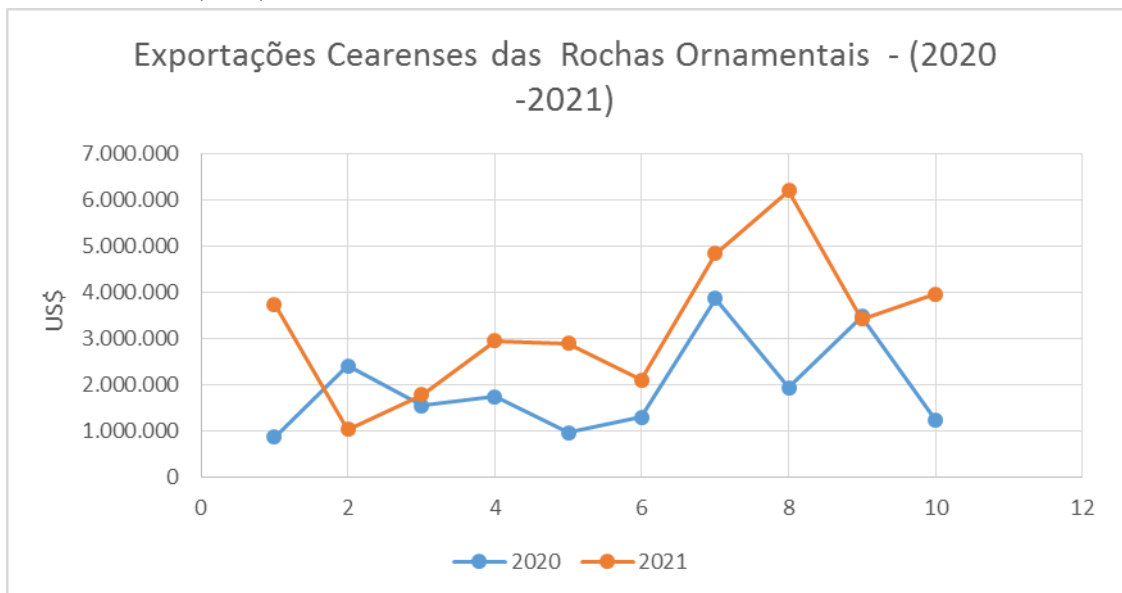
Tabela 3 - Reservas de rochas ornamentais e de revestimentos do estado do Ceará aprovadas pela ANM.

Substância	Medida	Indicada	Inferida
Granitos, Gnaisses e Afins	1.184.804.130	235.623	327.014.789
Mármore e Afins	137.889.785	137.889.785	0
Quartzito Ornamental	1.117.136.562	58.851.990	14.979.824
Arenito Ornamental	99.711.208	35.973.794	54.571.055
Ardósia	972.000	2.430.000	-
Outras Rochas Ornamentais (Pedra de Talhe, Pedra Sabão, Basalto, etc.)	201.686.767	35.847.380	6.373.229
Total	2.742.200.452	271.228.572	402.938.897

Fonte: Brasil (2019).

O Ceará foi responsável por 11% da produção de rochas ornamentais, tendo como base o ano de 2020 em um levantamento realizado pela ABIROCHAS, foram produzidas 1.000.000 toneladas de rochas ornamentais, onde, estão inseridos granito, pegmatito, limestones e pedra Cariri (calcário plaqueado). Além disso, o Ceará é o 3º estado com maior faturamento de exportações no Brasil, no ano de 2020 e 2021, sendo que mesmo com a pandemia o faturamento no mercado externo foi acrescido de forma positiva. O Gráfico 3, mostram o crescimento do mercado de rochas ornamentais no ano de 2021 tendo um aumento de 70,9% em relação ao ano anterior.

Gráfico 3 – Exportações das rochas ornamentais no Ceará nos meses de janeiro a outubro. FOB (US\$)



Fonte: Centro Internacional de Negócios da FIEC (2021) Dados: ComexStat.

De acordo com os dados obtidos da ComexStat, foi observado o crescimento no ano de 2021 somando um faturamento de US\$ 226.106, apresentando um aumento de 22,0% em relação ao ano de 2019, como exposto na Tabela 4.

Tabela 4 - Importações mês a mês das rochas ornamentais no estado do Ceará. FOB US\$

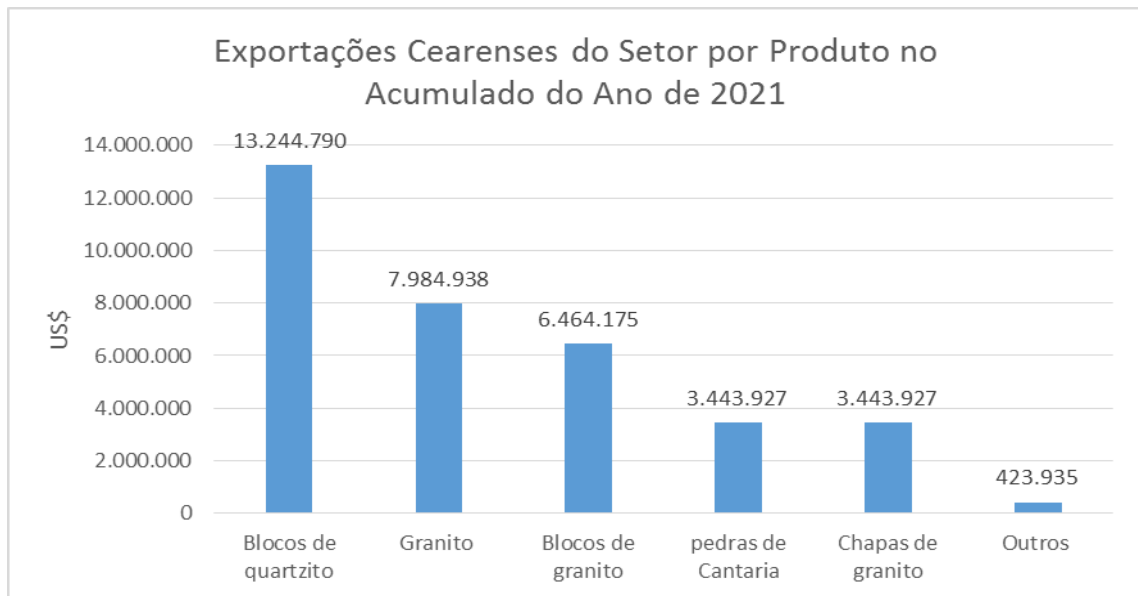
Meses	Importações em US\$ milhões	
	2020	2021
Janeiro	-	28.034
Fevereiro	42.106	-
Março	21.108	25.057
Abril	10.986	28.682
Maio	31.543	28.377
Junho	8.970	33.051
Julho	-	9.794
Agosto	-	20.978
Setembro	58.840	21.478
Outubro	13.853	30.665

Fonte: Centro Internacional de Negócios da FIEC (2021). Dados: ComexStat.

De acordo com Setorial em Comex Rochas Ornamentais no ano de 2021, os principais destinos de rochas ornamentais exportadas do Ceará foram Itália, Estados Unidos e China, com um faturamento de US\$ 16.913.048, US\$ 12.248.623 e US\$ 2.396.161, respectivamente. Os municípios do estado do Ceará que mais exportam são Caucaia, Santa Quitéria, Uruoca, Fortaleza e Sobral, com um faturamento de US\$ 9.870.815, US\$ 2.679.730, US\$ 1.942.018, US\$ 1.144.589, US\$ 933.707, nessa ordem.

O gráfico 4 mostra as rochas ornamentais com maior demanda no mercado, ressaltando uma preferência pelos quartzitos que apresenta um grande faturamento no ano de 2021, com um crescimento de 100,8% em relação ano anterior. Por seguinte, têm-se os granitos em blocos ou chapas, pedras de cantaria, chapas de granitos e outros tipos de rochas ornamentais.

Gráfico 4 – Principais produtos exportados no estado do Ceará no ano de 2021.



Fonte: Centro Internacional de Negócios da FIEC. (2021) Dados: ComexStat.

2.2 Lavra e beneficiamento de rochas ornamentais

Lavra ou extração consiste em uma atividade de remoção do material útil ou economicamente aproveitável em uma jazida. Nas rochas ornamentais os maciços rochosos podem ser lavrados através de desmonte, resultando em blocos e/ou chapas. Para iniciar a atividade de extração, devem ser considerados a condição geológica, a disposição do material, o volume a ser extraído e o melhor aproveitamento do material (VIDAL, 2013).

A escolha do método de lavra depende de alguns fatores como estruturas e propriedades da rocha, dimensão e formato do depósito mineral, presença de fraturas e a região que está inserido. Para a extração das rochas ornamentais e de revestimento o método mais utilizado são os de lavra a céu aberto, com um ciclo operacional tradicional de operações unitárias como perfuração, desmonte, carregamento e transporte para retirada do material de interesse econômico (CURI, 2017).

Vidal (2013), evidencia que diante das características da rocha e da região do seu entorno podem ser aplicados métodos de lavra distintos, sendo os métodos mais usuais os métodos de lavra a céu aberto, por bancadas altas e baixas e por painéis verticais. Em alguns casos a lavra à céu aberto pode ser inviável, podendo ser aplicado o método de lavra subterrânea.

Na lavra em bancadas o depósito mineral pode ser repartido em níveis consecutivos e evoluir lateralmente e de forma descendente. A altura da bancada é definida de acordo com o formato e as características da rocha. De acordo com o avanço da lavra o depósito pode ficar mais uniforme assumindo uma forma geométrica contínua com as alturas das bancadas mais padronizadas (CURI, 2017).

No método de bancadas baixas, os blocos extraídos apresentam dimensões menores e o produto final é retirado diretamente a partir da extração. A sua aplicação se dá em maciços homogêneos e de alta qualidade, onde as fraturas presentes nas rochas podem ser utilizadas como subsídios para os planos de separação dos blocos (VIDAL, 2013).

A lavra em bancadas altas (Figura 2) se dá por aberturas com geometrias em “L”, para separação dos blocos, sendo as aberturas realizadas sequencialmente em direções laterais. Os blocos extraídos, inicialmente, com uma maior dimensão são chamados “quadrotes” e passam por cortes produzindo “filões”, que são os blocos em menores dimensões. O método é utilizado em maciços heterogêneos de alta qualidade, com uma produção de grande aproveitamento do material (VIDAL, 2013).

Figura 2 - Lavra por bancadas altas: (a) abertura com geometria em “L”; (b) sequenciamento lateral; (c) blocos extraídos

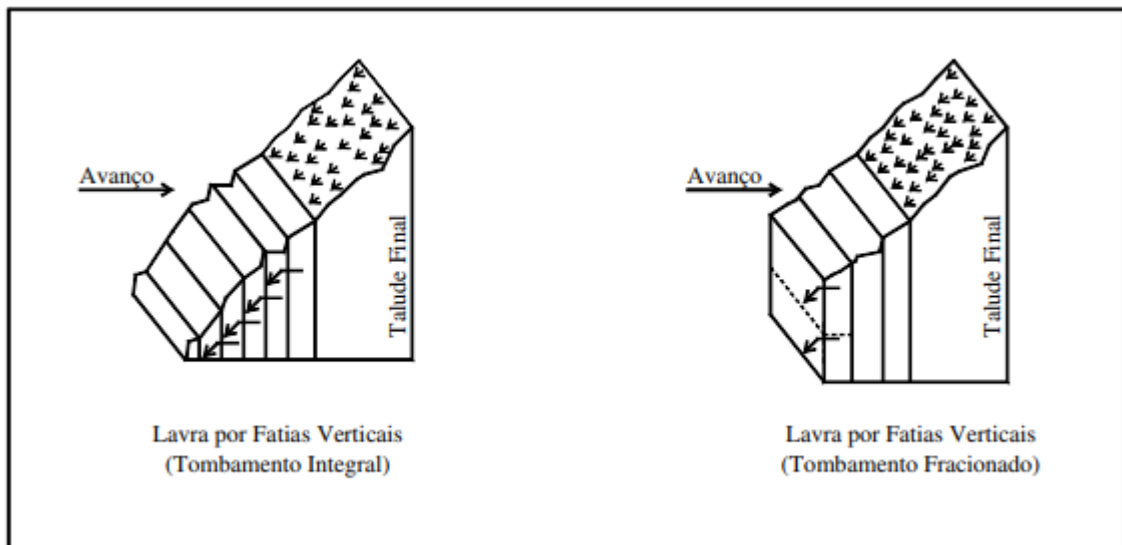


Fonte: Autoria Própria (2021).

O método de lavra em bancadas altas pode gerar blocos com volumes entre 3m^3 e 8m^3 ou até em 10m^3 . Nesta operação o bloco, inicialmente, pode ser destacado da frente de lavra por fogo de levante, na face posterior cortado por explosivos e na face lateral o corte contínuo pode ser utilizado. E os blocos secundários e finais, geralmente, são cortados por cunhas e cortes contínuos (CABELLO *et al.*, 2012).

A lavra de painéis verticais (Figura 3) é semelhante a lavra por bancadas, contendo a extração de painéis verticais, que são tombados e esquadrejados, obtendo-se blocos. Quando o painel passa pela fase de esquadrejamento são gerados rejeitos, que são dispostos ao redor do afloramento e, servem como suporte para chegar ao topo do maciço rochoso. Inicialmente, o avanço da lavra ocorre de maneira ascendente e após ter um aterro de rejeitos considerável o avanço da lavra pode torna-se descendente (VIDAL, 2013).

Figura 3 - Lavra por painéis verticais



Fonte: Cabello (2011).

Em regiões em que apenas a lavra subterrânea pode ser viável ou em frentes de lavras em que a lavra à céu aberto torna-se impraticável, são criados salões, que são espaços sustentados por pilares, constituídos de um material não aproveitável economicamente. Vidal (2013) explica a relação entre a sustentação dos pilares e abertura dos pilares: “A relação entre as áreas dos salões e pilares em alguns casos é elevada, em dependência da resistência geomecânica do maciço e da profundidade da frente de lavra”.

No Brasil, os métodos mais utilizados são os de lavra por maciço em bancadas altas associadas com painéis verticais, sendo o fio diamantado a tecnologia mais usada para cortes primários e isolamento de blocos primários, secundários, subdivisão em pranchas e esquadrejamento de blocos (CURI, 2017).

O beneficiamento é a atividade posterior a lavra, que têm como finalidade a preparação do material para o produto final. No beneficiamento primário ocorre a alteração dos blocos em chapas de diferentes tamanhos, através de ferramentas de corte visando produtos de qualidade e utilização de equipamentos com melhor custo benefício. No

beneficiamento secundário são realizados o acabamento, com finalidade deixar as chapas polidas com a superfície brilhosa e lisa (SILVEIRA, 2014).

Os blocos lavrados nas pedreiras podem ser serrados em chapas, tiras ou ou espessuras semelhantes ao produto final. A serragem é realizada por teares multilâmina, multifio, talha-blocos e/ou monofio. Sendo o último mais usado na produção de peças e acabamento de bordas e o talha-blocos na produção de ladrilhos regulares (ALMEIDA, 2014).

Um dos processos de serragem dos blocos utiliza teares multilâmina à granalha, onde é realizado com atribuição da abrasão ocasionada pela granalha em contato com a rocha. O tear movimenta multilâminas, sustentadas em colunas espaçadas, e dispostas longitudinalmente em relação à maior espessura do bloco. Os teares são tensionados paralelamente ao material que está sendo cortado. As lâminas ficam em quadros que são também chamados de porta-lâminas, acionados por um motor e conduzidos por um volante, produzindo um movimento perpendicular, causando o atrito entre as lâminas, a granalha e o bloco de rocha. (SILVEIRA, 2014).

Outro acessório utilizado em corte de blocos é o fio diamantado, esse fio é composto de anéis espaçados ao longo do seu comprimento e para realização do corte fica tensionado sobre o bloco com uma determinada velocidade e por forças abrasivas realiza o corte da rocha. O fio diamantado é acoplado em uma estrutura que podem ser monofio ou de multifios, acionados por um motor. O produto desse equipamento são chapas com retoque nas bordas para corte de chapas ou tiras bastante utilizadas em colunas de apoios e em bancos. Também utilizado no acabamento de peças para formar feições desejadas (SILVEIRA, 2014).

O seguimento do corte utilizando teares multifio (Figura 4) acontece através da ação abrasiva das pérolas diamantadas cravadas ao longo do fio, durante o corte há um fluxo de água constante para refrigeração auxiliando na eficiência do corte. O equipamento apresenta uma estrutura metálica podendo ter até 72 fios diamantados tensionados e dispostos em distâncias iguais entre si (ALMEIDA, 2014).

Figura 4 - Desdobramento de blocos em chapas utilizando multifio



Fonte: Autoria Própria (2021).

Além do fio diamantado os teares com lâminas diamantadas, geralmente, também são utilizados para corte. Esse método consiste em pequenas partículas de diamantes cravados no lado inferior das lâminas dispostas em um tear, utilizando forças abrasivas, semelhante a uma serra cortando a rocha em um movimento de vaivém, com movimento de descida sobre o bloco de rocha. Durante o corte, faz-se o uso de um fluido que tem finalidade a refrigeração e de limpeza e liberação dos fragmentos de rocha do bloco (SILVEIRA, 2014).

De acordo com Silveira (2014), durante o corte dos blocos de rochas ornamentais realizados no beneficiamento primário podem ser gerados rugosidades na superfície da rocha, sendo a rugosidade proporcional a qualidade do material, ou seja, quanto menos rugosa melhor a qualidade do material. Neste sentido, normalmente são necessárias etapas do beneficiamento secundário, onde o acabamento com polimento é um dos mais importantes.

O acabamento é uma atividade essencial para destacar as características da superfície da rocha como coloração, textura, estética da rocha, essenciais para colaborar com a sua aplicação. O polimento consiste na diminuição da rugosidade que são advindas do beneficiamento primário e estruturação, resultando em placas com brilho, através da abrasão. Elementos abrasivos de granulometrias decrescentes são atritados sobre o material, retirando a rugosidade até o grau de polimento ideal, de acordo com brilho desejado (SILVEIRA, 2014; ALMEIDA, 2014).

A escovação (Figura 5a) consiste em uma técnica de polimento utilizando um prato com escovas diamantadas, a rocha sai com um alto teor de polidez, sendo o produto final geralmente utilizado em pisos externos e peças de marmorarias. Têm-se também processo de flameamento (Figura 5b), em que a água e a chama de maçarico é jateado sobre a superfície da chapa à alta pressão e temperatura, através do choque térmico o material rochoso passa por uma etapa de descamação e vitrificação, resultando em uma superfície rústica e áspera. (SILVEIRA, 2014; ALMEIDA, 2014).

Figura 5 - Técnicas de beneficiamento secundário: (a) equipamento de escovação; (b) flameamento em chapas de rochas ornamentais



Fonte: Autoria Própria (2021).

2.3 Resíduos gerados na produção de rochas ornamentais

Mathielo *et al* (2019) evidencia que na cadeia produtiva de rochas ornamentais são gerados tipos distintos de resíduos, destacando que durante a lavra têm-se blocos irregulares (Figura 6a), blocos com manchas e/ou fissuras, fragmentos e pó de rochas que ficam dispostos em pilhas. De acordo com Santos *et al* (2013), na fase do beneficiamento são produzidos chapas através da serragem dos blocos, gerando um rejeito fino, o pó de rocha (Figura 6d e 6e). Este pó vem agregado a outros insumos utilizados na operação, geralmente, água, granalha e cal formando uma lama. Além de chapas inutilizáveis danificadas durante o processo (Figura 6b e 6c).

Figura 6 – Resíduos gerados durante a lavra e beneficiamento: (a) blocos não aproveitáveis; (b) resíduos da serraria e polimento – chapas e ladrilhos danificados; (c) chapa inutilizável; (d) e (e) resíduo fino



Fonte: Autoria Própria (2021).

De acordo com NBR 10004 (2004), resíduos sólidos podem ser definidos como: “Resíduos nos estados sólidos ou semi-sólidos, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição [...]”. Considerando a classificação apresentada nesta norma, que relaciona o tipo de resíduo de acordo com a atividade de origem, sua composição e possíveis danos causados ao meio ambiente, os resíduos gerados durante o processamento de rochas ornamentais podem ser classificados em não perigosos (classe II). Os resíduos classificados na classe II podem ser inertes ou não inertes.

Moreira *et al* (2003) exemplifica o resíduo lamelar formado durante o desdobramento de blocos em chapas, constituído de pó de rocha, podendo ou não estar associados a granalha metálica, cal e água, sendo classificado em inerte, por ser um material biodegradável e o seu descarte poder degradar o meio ambiente, contaminando o solo e/ou lençóis freáticos.

A disposição dos rejeitos em micro e pequenas empresas, geralmente, são realizadas em torno da lavra, promovendo impactos ambientais. Durante a fase de lavra, no desmonte de rochas podem ser gerados blocos irregulares não aproveitáveis, alocados no pátio da mina, podendo trazer malefícios em relação à segurança e para as atividades de frente de lavra. O resíduo com maior dificuldade de disposição são os gerados durante o beneficiamento primário, principalmente, os realizados por teares convencionais, sendo dispostos em locais inapropriados como em aterros não licenciados. O resíduo gerado nessa técnica é uma lama abrasiva composta de água, pó de rocha, com porções de ferro advindo da granalha de ferro ou aço, e cal (CAMPOS *et al.*, 2009).

Dentro da atividade de mineração, o setor de rochas ornamentais é um dos maiores produtores de resíduos sólidos, devido ao percentual de aproveitamento do material rochoso. Em 2003, em um estudo realizado pelo CETEM, observou-se a geração de 109 Mt de resíduos advindos da produção de rochas ornamentais no mundo em relação a produção de 78Mt de mineral bruto após extração e beneficiamento. Em 2011 a produção de resíduos foi de 170 Mt em relação a 120 Mt de material totalmente aproveitável (Campos *et al.*, 2014).

Segundo Campos *et al* (2014), no Brasil, no ano de 2012 foram produzidos cerca de 22 Mt de resíduos, sendo cerca de 90% resíduos gerados durante a lavra, na forma de blocos irregulares. Na fase do beneficiamento primário, cerca de 40 % do volume do bloco vira resíduo, 26% resíduo finos associados aos insumos e 14 % resíduos em dimensões maiores. Na serragem foram gerados cerca de 1,5 Mt de pó de rocha e 1Mt de fragmentos de rocha, por ano no país.

No ano de 2019 foram gerados aproximadamente 18 milhões de toneladas de resíduos no setor de rochas nacional, sendo 13,8 milhões de toneladas da fase de extração, 3,4 milhões de toneladas do beneficiamento primário e 0,7 milhão de tonelada do beneficiamento secundário (CAMARA *et al.*, 2021)

Segundo dados fornecidos pela Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais (2021), mostrados na Tabela 5, observa-se uma expressiva quantidade de rejeitos gerados no processamento de rochas brutas no Brasil.

Tabela 5 - Produção de rochas e rejeitos nos anos de 2014-2020 (valores em 1.000t)

Ano	Rocha brutas para processamento	Rejeito de processamento (41%)	Produção de rochas processadas
2014	8913,0	3654,0	5259,0
2015	8549,7	3505,4	5044,3
2016	8235,8	3360,9	4874,9
2017	8215,5	3368,4	4847,1
2018	7951,3	3260,0	4691,3
2019	8233,0	3375,5	4857,5
2020	8054,0	3302,1	4751,9

Fonte: ABIROCHAS (2021).

Mesmo com o avanço tecnológico e com inovações na indústria de mineração, durante as atividades de extração e beneficiamento cerca de 75% do material é não aproveitável. Alguns fatores são propícios para a diminuição da geração de resíduos em pedreiras, sendo predominante o aspecto geológico e as características do maciço rochoso,

para definição de equipamentos e método de lavra visando maior aproveitamento do material. Contudo, somente é possível com investimentos em pesquisa mineral e caracterização tecnológica avançada, a partir destes conhecimentos seriam executados planejamentos adequados para escolha de equipamentos, técnicas, tecnologias e mão de obra especializada em toda a cadeia produtiva (CAMPOS *et al.*, 2009).

Entretanto, no Brasil a maioria das empresas são de médio e pequeno porte, com desprovimento tecnológico e utilizando métodos rudimentares ou inapropriados, devido à falta de recursos ou conhecimentos. Dessa forma, com a grande geração de material não aproveitável, propõe-se alternativas de gerenciar os resíduos, visando aumentar uso de recursos naturais disponíveis, e reduzir possíveis impactos ocasionados ao meio ambiente (CAMPOS *et al.*, 2009).

Ao longo dos anos, houve um crescimento de práticas voltadas para a preservação do meio ambiente, sendo a disposição dos rejeitos na indústria de mineração um desafio para este setor. De acordo com Vidal *et al.* (2013), as diretrizes das sociedades modernas, já engajadas na busca do desenvolvimento sustentável, visam minimizar a produção de resíduos, e maximizar o uso dos recursos naturais não renováveis. Por isso, em todos os países e, particularmente no Brasil, tanto a legislação ambiental, quanto a Política Nacional de Resíduos Sólidos, requerem que sejam buscadas soluções técnicas para aproveitamentos desses resíduos.

2.4 Aproveitamento de resíduos de rochas ornamentais

Campos *et al.* (2009) destaca que durante a lavra, os resíduos formados devem ser dispostos em locais estáveis ou em aterros licenciados, e longe ou fora de locais inapropriados, ou seja, próximos de rios e córregos, solos com drenos ou em encostas de morros e, posteriormente, possam ser averiguados o aproveitamento destes materiais. No Brasil, os autores afirmam que os resíduos grosseiros podem ser britados e/ou moídos, e têm-se grande destaque em aplicações industriais, como brita, areia, argamassa e tinta como matéria-prima.

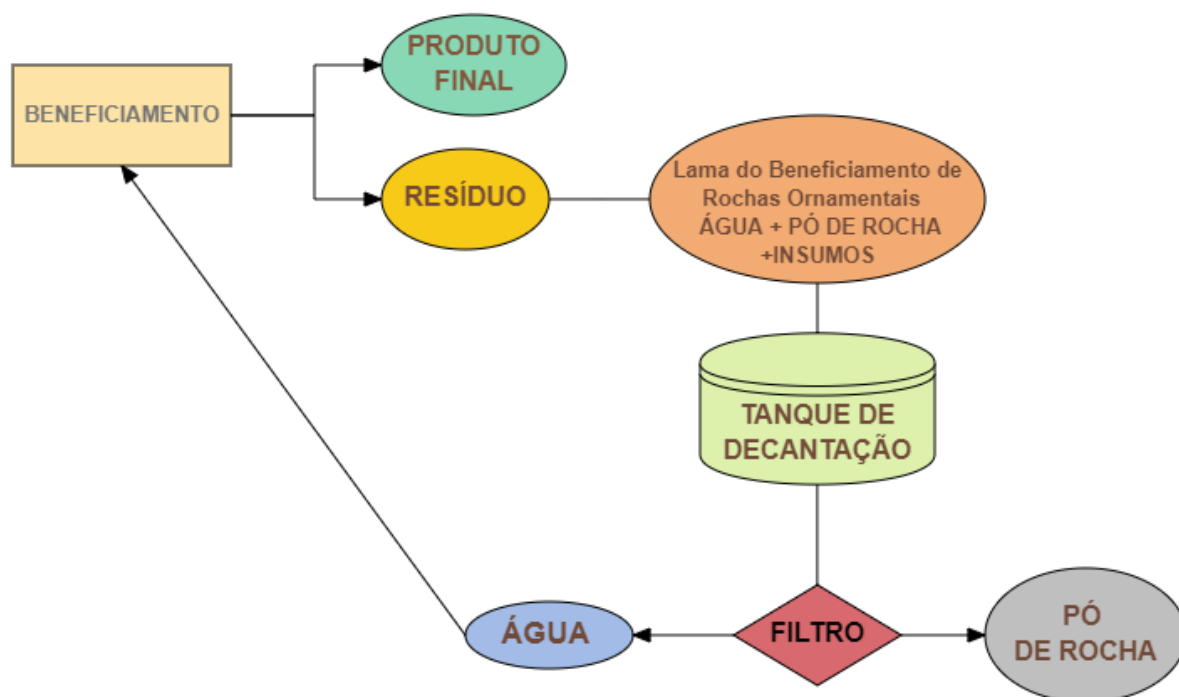
Carlete (2016) destaca que, os blocos não aproveitáveis podem ser transformados em resíduos grosseiros, devidamente, alocados em aterros licenciados e, posteriormente, através de análises serem destinados a setores que viabilizam o seu uso. Um exemplo de reutilização, são os agregados para a construção civil, utilizados para a produção de concreto, sendo os mais utilizados a brita 1, brita 0 e a areia de brita.

Santos *et al.* (2013) salienta que além dos resíduos grosseiros, têm-se os resíduos sólidos com granulometria fina com potencialidade de uso em diferentes indústrias. As características dos resíduos diferem em cada processo, tornando-os mais atrativos ou não para o seu reuso. O resíduo fino ou pó de rocha representa a maior volume de resíduo gerado na cadeia produtiva de rochas ornamentais. Moreira *et al.* (2021), aponta que o pó de rocha, advindo da lama do beneficiamento de rochas ornamentais, vem sendo aplicado como matéria-prima na fabricação de concreto e argamassa, cimento, cerâmica vermelha, tijolos e vidrados.

Os resíduos provenientes do desdobramento, passam por um processo de separação sólido/líquido, sendo a técnica mais usada a decantação. Geralmente, utilizam-se tanques de decantação vertical ou cilindro-cônico, seguido por filtro de prensas ou de discos ou tanques de decantação com filtros associados. Neste caso, a água é reutilizada, e o resíduo fino alocado no pátio da empresa para secagem ou destinados a aterros licenciados. Em razão do grande volume de finos produzidos diariamente, atualmente, são estudadas possíveis aplicações industriais, como aproveitamento para fabricação de cerâmicas, tijolos, vidros e rochagem. Porém, a proporção de resíduos e aplicação industrial ainda é baixa, mesmo com o avanço nas pesquisas para possíveis aplicações, a indústria ainda não atribuiu essa prática (CAMPOS *et al.*, 2009).

A Figura 7 mostra o sequenciamento de operações realizadas com os produtos gerados na etapa de beneficiamento, podendo ser gerados dois materiais, o produto final constituído por chapas e/ou ladrilhos e o resíduo formado pela mistura de água, pó de rocha e insumos. A lama residual inserida nos tanques de decantação e adicionado flocculantes para decantação do pó de rocha nos tanques, através do bombeamento a água passa por um filtro separando a água do pó de rocha. E por fim, a água é recirculada e o pó de rocha é direcionado para disposição e tratamento adequados.

Figura 7 – Fluxograma separação sólido/líquido dos resíduos provenientes do beneficiamento de rochas ornamentais.

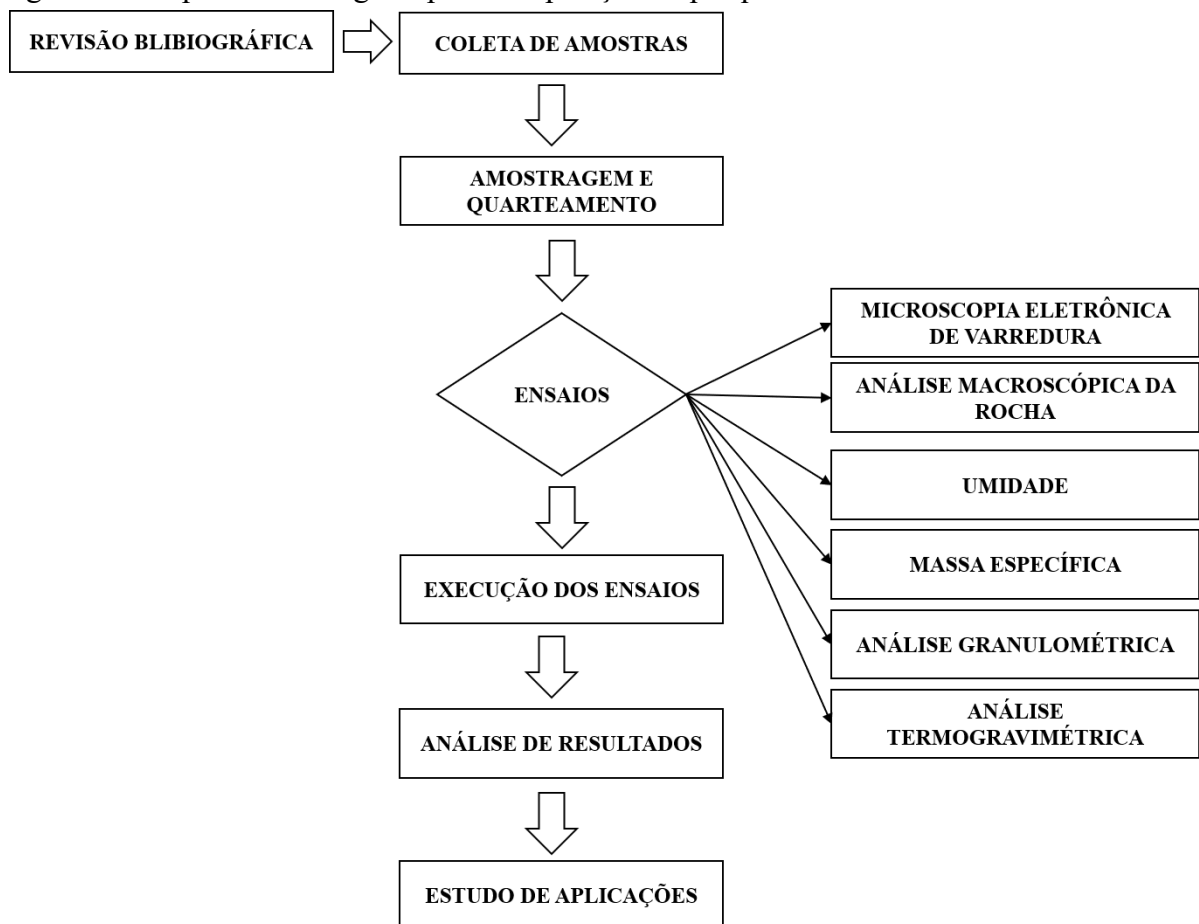


Fonte: Autoria Própria (2022)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura 8 apresenta um fluxograma das etapas realizadas neste estudo, onde, inicialmente, foi realizada uma revisão bibliográfica sobre rochas ornamentais e a geração de resíduos nesse setor industrial. Posteriormente, foi realizada a amostragem e ensaios de caracterização de um resíduo fino gerado no processamento de granito. Em seguida, foi realizado um estudo dos principais trabalhos realizados sobre o aproveitamento deste tipo de resíduo.

Figura 8 – Etapas metodológicas para composição da pesquisa



Fonte: Autoria Própria (2022).

O material utilizado no estudo foi coletado no período de 31 de agosto de 2021, em uma pilha de resíduos provenientes do filtro prensa em uma empresa localizada no estado do Ceará, com principal produto o granito. Foram coletados, aproximadamente, 4,3 kg de material.

3.1 Amostragem

De acordo com a NBR 10007 (1987): “O objetivo da amostragem é a coleta de uma quantidade representativa de resíduos, visando determinar suas características quanto à classificação, métodos de tratamento, etc.” Sampaio *et al* (2007), evidencia que para a caracterização de um determinado material, deve ser utilizado uma amostra representativa e, para melhor obtenção de representatividade, deve ser realizado amostragem com exatidão.

A amostra do resíduo foi coletada em uma pilha de empresa localizada no estado do Ceará. A preparação da amostra foi realizada no Laboratório de Geologia da UFC em Crateús. O material foi homogeneizado e quarteado em pilhas alongadas e cônicas como descritas por Sampaio *et al* (2007).

Inicialmente, o lote foi homogeneizado para obtenção de um material integralmente distribuído. Na homogeneização o material uniforme é quarteado em porções de menor massa, na pilha cônica o material deve ser disposto sobre o centro de uma lona e as laterais devem ser puxadas de forma alternada, fazendo o movimento em que as partículas dispostas na base da pilha sejam deslocadas para o topo, tornando-o um material homogêneo. E na pilha longitudinal o material deve ser disposto ao longo da bancada longitudinalmente, as extremidades devem ser removidas e relocadas ao longo da pilha (SAMPAIO *et al.*, 2007).

Para preparação da amostra primária foram realizadas no lote a homogeneização e quarteamento por pilha longitudinal. Todo o material coletado em campo foi disposto ao longo da lona, primeiramente da esquerda para a direita e posteriormente da direita para a esquerda e assim, sucessivamente. Com a pilha formada, as extremidades foram retiradas e alocadas ao longo da pilha, posteriormente, a pilha foi dividida em segmentos e retirados alternadamente formando a amostra (Figura 9).

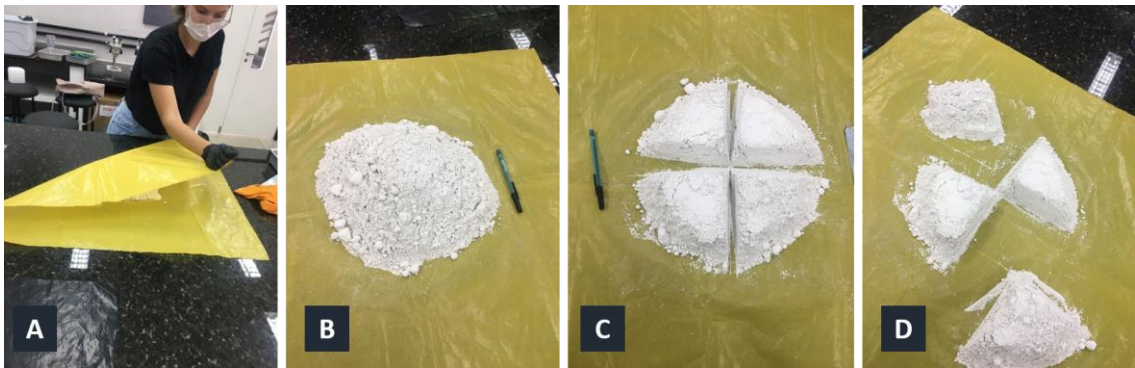
Figura 9 – Pilha longitudinal: (a) Homogeneização; (b) Quarteamento; (c) Formação da amostra



Fonte: Autoria Própria (2022).

Com o material homogeneizado foram realizados o quartejamento da amostra primária em alíquotas com a massa de acordo com os ensaios de caracterização. Para isso foram realizados homogeneização e quartejamento por pilha cônica sucessivas vezes. O material disposto em uma lona homogeneizado em formato de cone foi achatado e dividido em quatro porções, e retirados as porções dispostas diagonalmente entre si formando o material com a massa, aproximadamente, especificada para cada ensaio (Figura 10).

Figura 10 – Pilha cônica: (a) Homogeneização; (b) Pilha cônica; (c) Quartejamento; (d) Formação das alíquotas

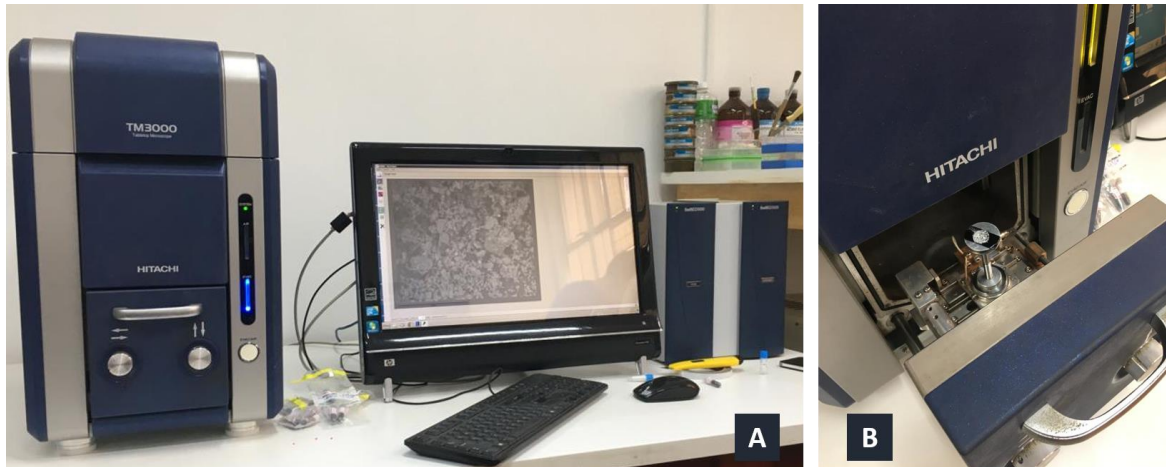


Fonte: Autoria Própria (2022).

3.2 Microscopia eletrônica de varredura – MEV

Para a realização do ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi utilizado um microscópio eletrônico de bancada *Hitachi TM 3000 Tabletop Microscope* com periférico acoplado do tipo EDS (Energia Dispersiva de Raio X) *Swift ED 3000* (Figura 11a), localizado no Laboratório de Microscopia Eletrônica no Departamento de Geologia da UFC em Fortaleza. A amostra em pó foi inserida no equipamento utilizando um fixador (Figura 11b), e através das funcionalidades do equipamento por meio da emissão de feixes de elétrons e do software associado ao equipamento foi possível obter imagens e realizar o mapeamento químico da amostra de resíduo fino de granito.

Figura 11 – (a) Equipamento de microscopia de varredura; (b) Amostra acoplada ao equipamento para análise.



Fonte: Autoria Própria (2022).

3.3 Análise macroscópica da rocha

De Oliveiras Menezes (2013) destaca o objetivo da análise macroscópica das rochas, chegar ao nome da amostra a partir de características visíveis e reconhecimento dos minerais. Com essa finalidade, foi realizado a identificação dos minerais na rocha de origem do resíduo de granito e indicada as porcentagens contidas na amostra, no Laboratório de Geologia da UFC em Crateús. A partir disso, foi possível a construção do diagrama QAP com auxílio dos dados obtidos no MEV/EDS.

3.4 Umidade

Chaves (2002) define umidade como: “quantidade de água presente no sólido dividida pela massa de sólidos (seca).” Para o ensaio de umidade em estufa foi pesado a amostra antes e depois de passar pela estufa no Laboratório de Química da UFC em Crateús e realizado o cálculo da umidade com base na equação 3.1.

$$\text{Umidade (\%)} = \frac{\text{massa úmida} - \text{massa seca}}{\text{massa seca}} \times 100 \quad (3.1)$$

3.5 Massa específica real e aparente

De acordo com a NM 52 (2003), o que difere a massa específica real da massa específica aparente, é a inclusão dos poros permeáveis na relação entre a massa dos agregados secos e seu volume. Para determinação da massa específica real, foi realizado o ensaio por picnometria à água baseado na norma DNER 093 (1994). O ensaio foi realizado no Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação da UFC em Fortaleza.

Inicialmente, foi pesado o picnômetro vazio e por seguinte a pesagem do conjunto (picnômetro + amostra). Posteriormente, foi adicionado água destilada até cobrir a amostra e aquecido por 15 minutos, para retirada do ar. Após resfriamento do picnomêtro aquecido, foi preenchido com água destilada, e realizado a pesagem do conjunto (picnômetro + amostra + água). Por seguinte foi esvaziado o picnômetro, e preenchido com água e pesado o conjunto (água + picnômetro).

A partir dos dados obtidos nas pesagens (Figura 12) aplicou-se na equação 3.2.

$$D = \frac{P2 - P1}{(P4 - P1) - (P3 - P2)} \quad (3.2)$$

Onde:

D – Densidade real

P1 – Peso do picnômetro vazio e seco (g)

P2 – Peso do picnômetro + amostra (g)

P3 – Peso do picnômetro + amostra + água (g)

P4 – Peso do picnômetro + água (g)

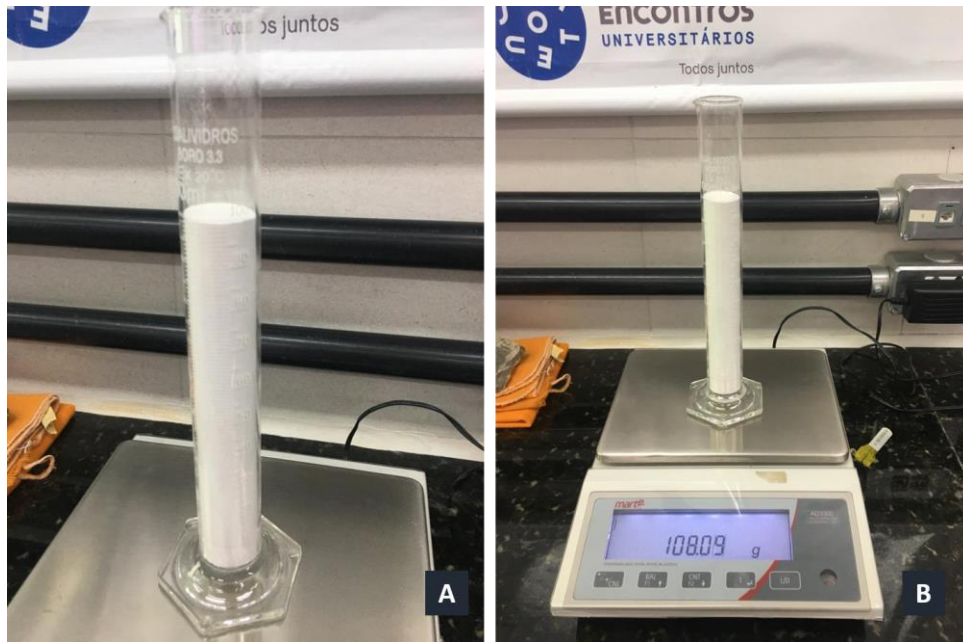
Figura 12 - Imagem ilustrativa das pesagens para determinação da massa específica real: (a) Picnômetro vazio; (b) Picnômetro + amostra; (c) Picnômetro + água + amostra; (d) Picnômetro + água



Fonte: Autoria Própria (2022)

Para a determinação da densidade aparente, observa-se o volume ocupado por um determinado material e a equivalência do seu peso. O ensaio de densidade aparente foi realizado no Laboratório de Geologia da UFC em Crateús, utilizando uma proveta de 100 ml e uma balança de bancada (Figura 13).

Figura 13 – Imagem ilustrativa para determinação da massa específica aparente: (a) Amostra na proveta de 100 ml; (b) Pesagem da amostra



Fonte: Autoria Própria (2022).

3.6 Análise granulométrica

Para a análise granulométrica foram realizados ensaios de peneiramento fino e sedimentação, seguindo o procedimento exposto na NBR 7181 (1984). Os ensaios foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação da UFC em Fortaleza.

Na sedimentação (Figura 14), do material peneirado na abertura de 2,0 mm, 70g foi transferido para um recipiente e adicionado 120ml solução de hexametáfosfato de sódio para agir como defloculante. Essa mistura foi vertida no copo de dispersão, e adicionada água destilada ao nível que a água ficou 5 cm da borda do copo e, posteriormente, foi submetida a ação do aparelho por 15 minutos. Essa mistura, após agitação, foi transferida para uma proveta e preenchida com 1000ml de água destilada, posteriormente, foi adicionado o densímetro e efetuado leituras. Após a última leitura, o material foi vertido na peneira de 0,075mm.

Figura 14 - Sedimentação: (a) 70 g do material passante na peneira de 2 mm; (b) Defloculante adicionado na amostra; (c) Copo de dispersão; (d) Leituras com o densímetro



Fonte: Autoria Própria (2022).

Para a análise granulométrica do peneiramento a fino, o material retido na peneira de 0,075mm, foi seco, e passado nas peneiras (Figura 15) com aberturas de 1,2mm, 0,6mm, 0,42mm, 0,25mm, 0,15mm e 0,075mm.

Figura 15 - Conjunto de peneiras



Fonte: Autoria Própria (2022).

3.7 Análise termogravimétrica

A análise termogravimétrica da amostra foi realizada utilizando o equipamento *Netzsch STA 449 F3 Jupiter* (Figura 16), localizado no Laboratório de Análise Térmica do Departamento de Física da UFC em Fortaleza. A análise foi realizada utilizando uma rampa de aquecimento de 10°C/min com temperatura final de 500°C utilizando fluxo de nitrogênio analítico. De acordo com a variação de temperatura, foi possível observar a perda ou ganho de massa da amostra e obter conhecimento dos efeitos que o aquecimento pode resultar na amostra.

Figura 16 – Equipamento utilizado para análise termogravimétrica:
(a) vista geral e (b) vista do porta amostra



Fonte: Autoria Própria (2022).

3.8 Estudo das principais aplicações

Com o objetivo de conhecer as principais aplicações deste tipo de material, foi realizado um levantamento bibliográfico utilizando os sites de busca brasileiros de trabalhos científicos, optando-se por escolher um estudo de caso para algumas aplicações. Foram considerados as palavras-chaves: resíduos finos de granito e aproveitamento. A seleção dos textos foi feita nos últimos 5 anos, em conformidade com o assunto proposto, sendo excluídos os estudos que, apesar de constarem no resultado da busca não apresentaram dados relevantes sobre o tema proposto para o estudo.

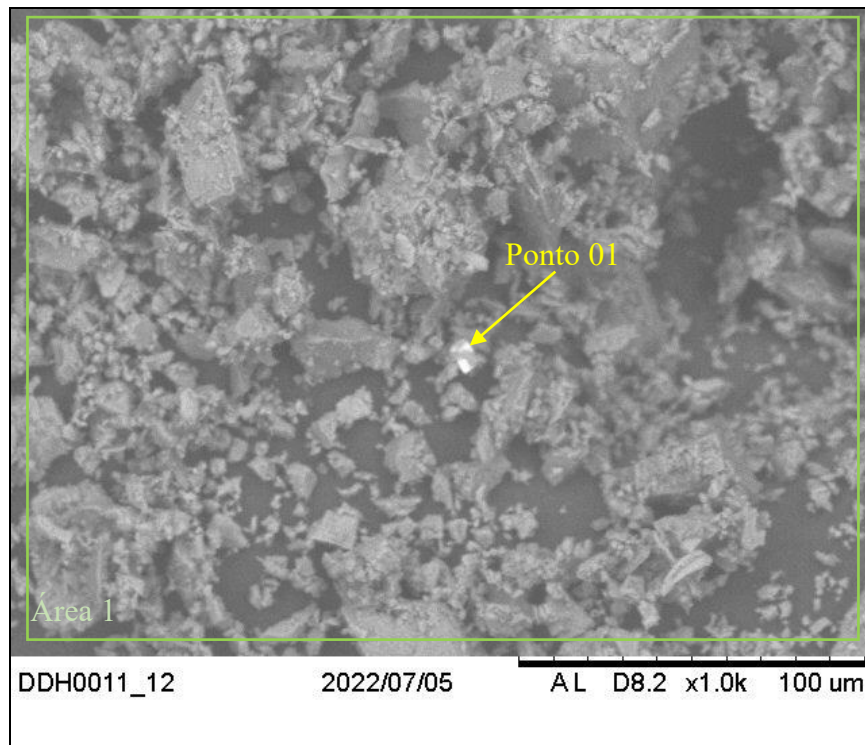
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Microscopia eletrônica de varredura – MEV

A Figura 17 apresenta uma imagem do resíduo de granito com um aumento de 1000 vezes. Pode-se observar a presença de alguns minerais, devido a diferença de tons de cinza apresentada na imagem. Além disso nota-se que a maioria das partículas apresentam granulometria fina menor que 0,1mm. A área verde, demarcada na Figura 17, mostra a região em que foi realizado o mapeamento com o EDS, sendo possível notar a presença de elementos como silício, oxigênio, alumínio, sódio, potássio e ferro, exposto na Tabela 6 e no Gráfico 5.

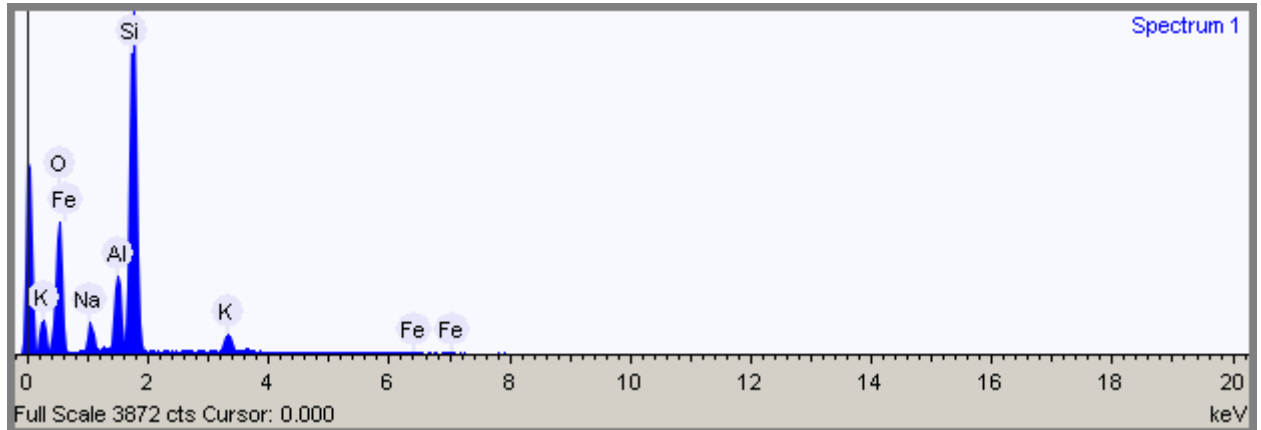
Além disso, no ponto 01, foi possível observar a presença de elementos químicos como silício, zircônio e oxigênio em maiores proporções (Tabela 6 e Gráfico 6), podendo-se inferir a presença do mineral zircão ($ZrSiO_4$) na amostra de resíduo de granito.

Figura 17 – Morfologia das partículas de resíduo de granito



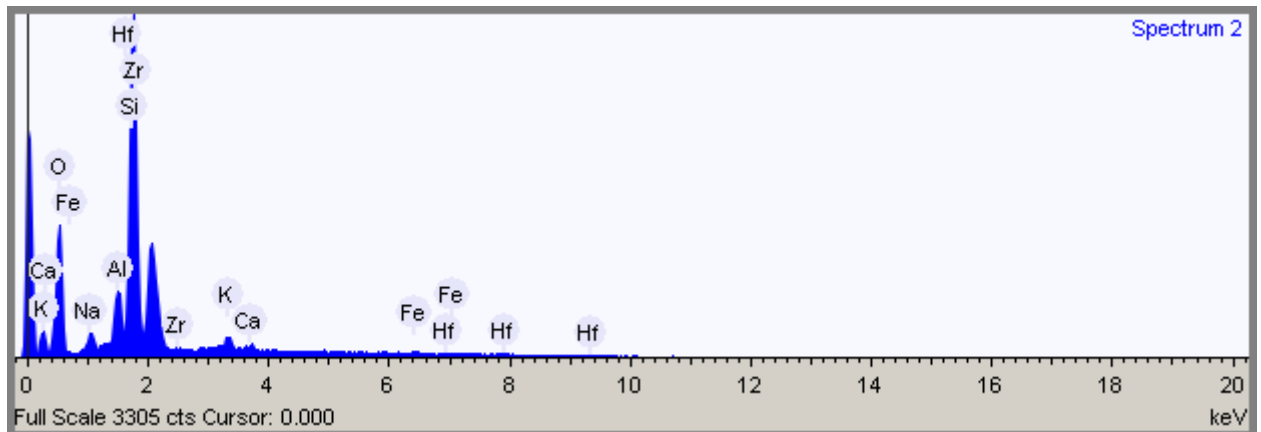
Fonte: Autoria Própria (2022).

Gráfico 5 – Elementos químicos detectados no mapeamento da área 1



Fonte: Autoria Própria (2022).

Gráfico 6 – Elementos químicos determinados no ponto 01



Fonte: Autoria Própria (2022).

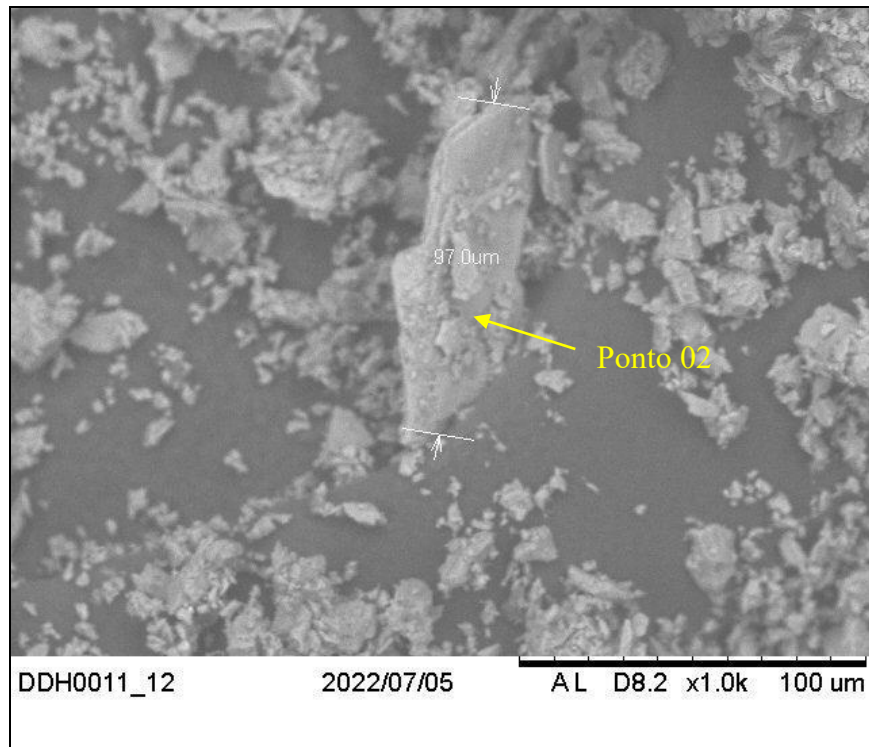
Tabela 6 – Composição química detectados no mapeamento da área 1 e nos pontos 1 e 2 da amostra do resíduo de granito

Elemento	Peso %		
	Visão Geral	Ponto 01	Ponto 02
Sódio	3,519	1,807	3,150
Alumínio	6,556	3,634	9,172
Silício	36,416	24,546	28,368
Potássio	4,252	1,635	8,146
Ferro	0,814	1,042	6,160
Oxigênio	49,443	41,448	45,004
Cálcio	-	0,638	-
Zircônio	-	24,535	-

Fonte: Autoria Própria (2022).

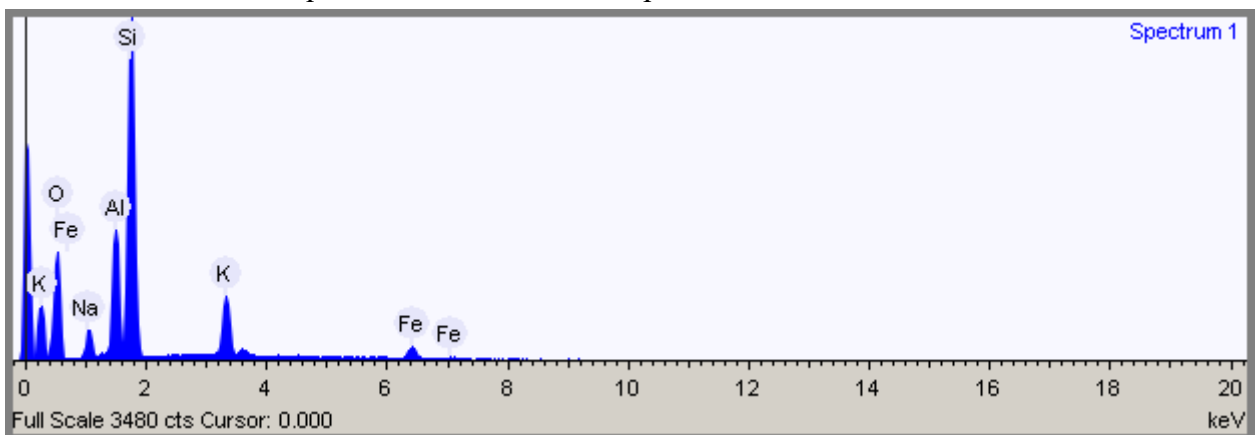
A Tabela 6 e o Gráfico 7 demonstram os resultados da análise química dos elementos realizada através do EDS no ponto da partícula, podendo-se observar uma típica albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$). A Figura 18 destaca o tamanho das partículas desse mineral presente na amostra de granito, estando em torno de 0,097mm.

Figura 18 – Morfologia das partículas de resíduo de granito evidenciando o mineral albita.



Fonte: Autoria Própria (2022).

Gráfico 7 - Elementos químicos determinados no ponto 02



Fonte: Autoria Própria (2022).

Em ambas as análises pode-se notar a presença de elementos químicos como silício, oxigênio, alumínio, sódio, potássio e ferro. A presença das porcentagens de ferro nessa amostra de resíduo pode está associada a composição da rocha ou de insumos utilizados no tratamento destes materiais.

4.2 Análise macroscópica da rocha

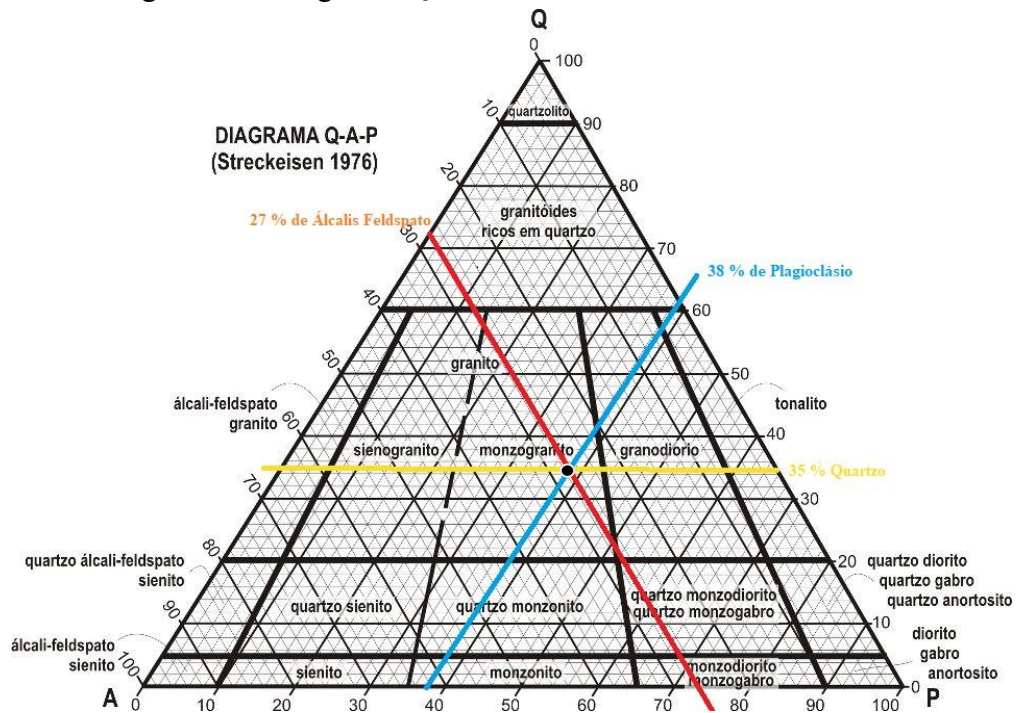
A Figura 19 mostra a rocha de origem do resíduo estudado. A partir da análise macroscópica da rocha foi possível observar a presença de quartzo (31%), feldspato potássico (25%), plagioclásio (35%), biotita (5%), epídoto (3%) e muscovita (1%). A parte branca da rocha composta por feldspato potássico e albita compõem a matriz da rocha, sendo de difícil identificação das porcentagens desses minerais, contudo, a partir dos resultados apresentados no MEV/EDS pode-se observar uma relação próxima desses minerais. Dessa forma, com o diagrama QAP (Figura 20), identificou-se que a rocha se trata de um monzogranito.

Figura 19 – Monzogranito



Fonte: Autoria Própria (2022).

Figura 20 – Diagrama QAP



Foi possível observar também o tamanho das partículas (Tabela 7). Na matriz branca foi possível observar os quartzos em forma de grãos semiarredondados dispersos na rocha, e também a presença do mineral epídoto associado a biotita.

Tabela 7 – Tamanho das partículas

Minerais	Tamanho das partículas (mm)
Quartzo	2 - 9
Biotita	2 - 4
Epídoto	2 - 3
Muscovita	1
Partículas em geral	1 - 9

Fonte: Autoria Própria (2022)

4.3 Umidade

A Tabela 8 apresenta o teor de umidade obtido para a amostra, sendo possível observar um baixo teor de umidade, com um valor de aproximadamente 1%. Esse valor é condizente com o observado na amostragem, uma vez que o material foi coletado na pilha, posterior a etapa de filtragem.

Tabela 8 – Teor de umidade

Medidas	Pesos (g)					Umidade (%)	Média	Erro
	Cápsula	Cápsula + Solo + Água	Cápsula + Solo	Água	Solo Seco			
1	206,39	270,63	270,13	0,50	63,74	0,78	0,97	0,19
2	208,64	266,47	265,81	0,66	57,17	1,15		

Fonte: Autoria Própria (2022).

4.4 Massa específica real e aparente

A Tabela 9 apresenta os resultados de densidade por meio do ensaio de picnometria a água.

Tabela 9 – Resultados do ensaio de massa específica real com o picnômetro

Medidas	Pesos (g)				Massa específica (g/cm ³)	Média	Erro
	P1	P2	P3	P4			
1	36,39	46,35	92,94	87,01	2,47	2,52	0,04
2	38,53	48,4	95,72	89,82	2,49		
3	40,52	49,64	97,88	92,25	2,61		

Fonte: Autoria Própria (2022).

Klein & Dutrow (2012) evidenciam que um típico granito é constituído, predominantemente, de quartzo, plagioclásio rico em sódio e feldspato potássico. Os autores destacam que esses minerais apresentam densidade igual a 2,65 g/cm³, 2,62 g/cm³, e 2,54 – 2,57 g/cm³, respectivamente. Analisando a média das densidades desses minerais e o valor encontrado nos ensaios para determinação densidade, pode-se observar um valor aproximado para a amostra de resíduo de granito.

A Tabela 10 mostra os resultados obtidos para determinação da massa específica aparente.

Tabela 10 - Resultados do ensaio de massa específica aparente

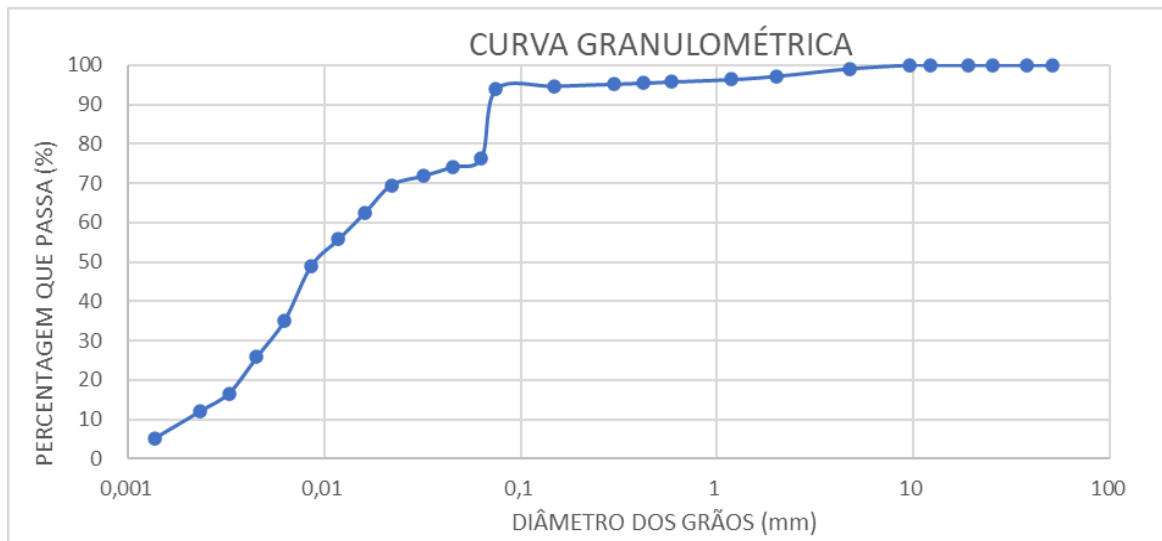
Medidas	Volume (ml)	Peso (g)	Massa específica (g/cm ³)	Média	Erro
1	100	106,62	1,066	1,074	0,007
2	100	108,09	1,081		

Fonte: Autoria Própria (2022).

4.5 Análise granulométrica

O gráfico 8 apresenta a curva de distribuição de tamanho de partículas da amostra de resíduo, cujo os dados estão resumidos na Tabela 11. Pode-se observar que grande parte do material se classifica na fração areia fina, silte e argila, tendo 18,76 % das partículas com diâmetro de 0,20 mm a 0,060 mm, 64,8 % do material com diâmetro de 0,06mm a 0,002 mm e 12,02% com diâmetro abaixo de 0,002mm.

Gráfico 8 – Curva de distribuição do tamanho das partículas



Fonte: Autoria Própria (2022)

Tabela 11 – Dados granulométricos

Classificação	Diâmetro da Partícula	(%)
Pedregulho	Acima de 4,8 mm	0,92
Areia Grossa	2,0 - 0,60 mm	1,44
Areia média	0,60 - 0,20	0,57
Areia Fina	0,20 - 0,06	18,76
Silte	0,06 - 0,002	64,37
Argila	Abaixo de 0,0002	12,02

Fonte: Autoria Própria (2022)

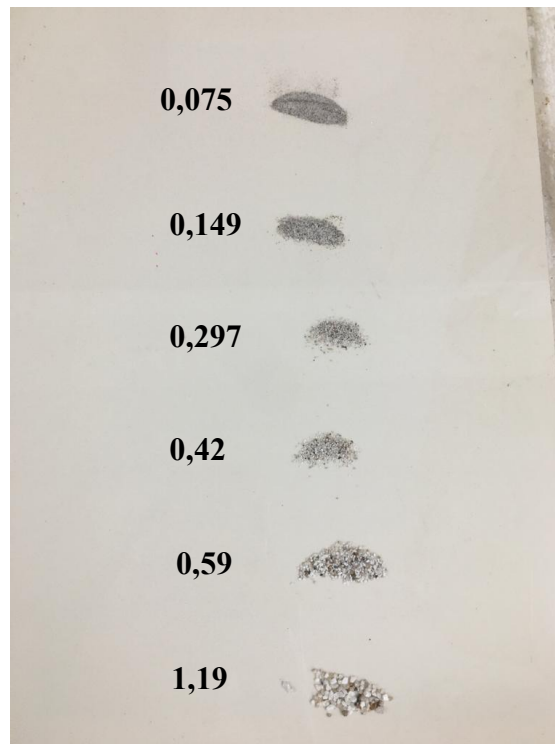
A Tabela 12 e a Figura 21 mostram o peso e o material retido nas peneiras com aberturas de 1,2mm, 0,6mm, 0,42mm, 0,25mm, 0,15mm e 0,075mm utilizadas no peneiramento a fino.

Tabela 12 – Dados peneiramento a fino

PENEIRAMENTO A FINO				
Peneira		Peso Retido (g)	Peso Passante (g)	% Passante Amostra Total
Polegada	Abertura (mm)			
Nº 16	1,19	0,59	69,41	96
Nº 30	0,59	0,45	68,96	96
Nº 40	0,42	0,21	68,75	95
Nº 50	0,297	0,2	68,55	95
Nº 100	0,149	0,38	68,17	95
Nº 200	0,075	0,5	67,67	94

Fonte: Aatoria Própria (2022).

Figura 21 – Material retido no peneiramento a fino



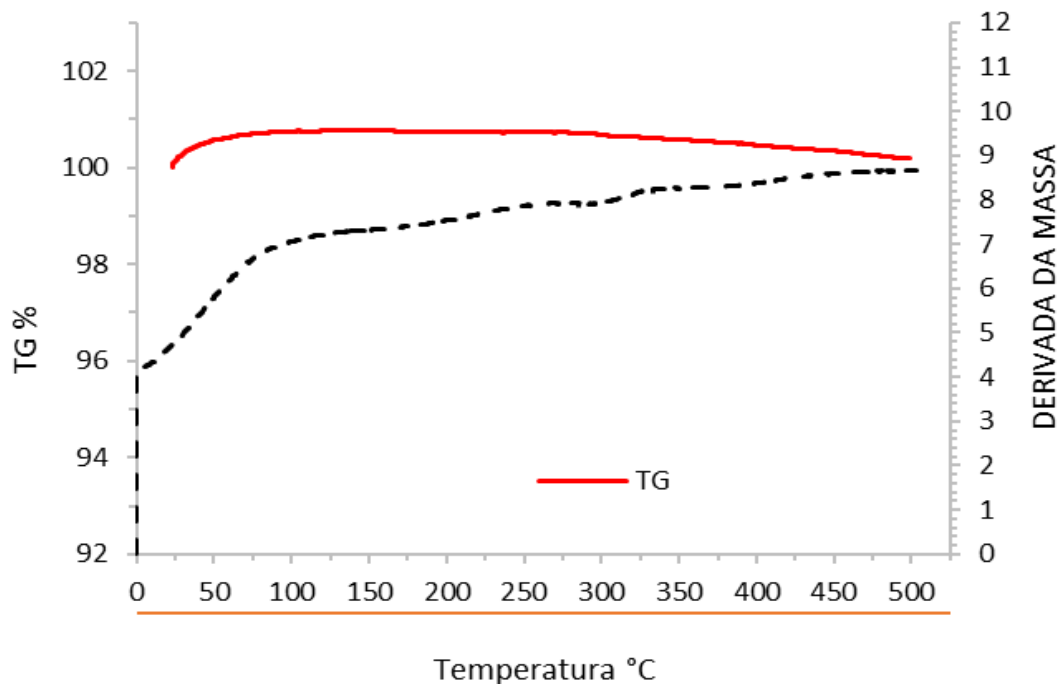
Fonte: Aatoria Própria (2022).

Através dos resultados do ensaio de sedimentação e peneiramento a fino, observa-se que a granulometria do material se constitui de um material fino, com 90% das partículas menores que 0,09 mm, semelhante a granulometria de materiais utilizados na incorporação para fabricação de cerâmicas, tijolos, entre outros materiais na construção civil.

4.6 Análise termogravimétrica

O Gráfico 9 apresenta o comportamento da amostra durante a análise termogravimétrica, pode-se observar que de 0 a 100°C ocorreu somente perda de água. Durante o aumento das temperaturas a amostra demonstrou comportamento térmico estável não havendo perda de massa considerável até a temperatura de 500°C.

Gráfico 9 – Análise termogravimétrica do resíduo de granito



Fonte: Autoria Própria (2022).

4.7 Estudo das principais aplicações

4.7.1 Cerâmica vermelha

Visando o aproveitamento dos resíduos gerados durante o beneficiamento primário das rochas ornamentais, alguns autores estudaram a viabilidade de utilização do pó de rocha para a fabricação de cerâmica vermelha. Bandeira *et al* (2018) avaliaram corpos cerâmicos com a adição de diferentes porcentagens de resíduos finos da rocha granítica em massa cerâmica.

Foram determinadas as composições químicas da massa argilosa e da massa de resíduos através de fluorescência de raios x. A argila e o pó de rocha passaram por processos como destorroamento e peneiramento com abertura de 0,177 mm. Durante o peneiramento

foi observado que o resíduo apresenta partículas menores que a argila. Para a avaliação foram adicionados 0%, 10%, 20%, 30%, 40% e 50% de massa de resíduo, e sinterizadas no formato de corpos cilíndricos a temperaturas de 850°C, 900°C e 950°C, com base na fabricação de cerâmicas vermelhas. Foram realizados ensaios físicos de umidade de prensagem, retração linear de queima, absorção de água, massa específica aparente e porosidade aparente, e ensaios mecânicos de resistência à compressão (BANDEIRA *et al.*, 2018).

Pela FRX, a composição química do resíduo mostra maior presença de SiO₂ (68,3%) e Al₂O₃ (15,8%) e em menor proporção Fe₂O₃(3,2%), K₂O (4,3%), CaO (3,3%), Na₂O (2,9%), sendo possível concluir que o material de origem seria um granito. Através de ensaios mecânicos, foi observado que os corpos de provas com até 40% de incorporação dos resíduos mantêm uma qualidade usual e a partir de 50% o material mostrou perda de qualidade e baixa resistência (BANDEIRA *et al.*, 2018).

O material cerâmico com a massa de resíduo apresentou uma menor absorção de água, menor porosidade e maior massa específica. A massa cerâmica com 20%, 30% e 40% tiveram maior retração linear a queima a 850°C e manteve-se constante a 900°C, enquanto que a 950°C houve uma menor retração linear. A resistência à compressão tem pouca alterabilidade durante a sinterização nas diferentes temperaturas, contudo a 40% houve um pequeno declínio na resistência. A partir da análise dos resultados, observou-se que até 30% de massa residual associada a massa de cerâmica não alteram gradativamente as propriedades físicas e mecânicas do resultado final do produto da cerâmica (BANDEIRA *et al.*, 2018).

4.7.2 Blocos de concreto

Com a alta demanda da construção civil e com a alta geração de resíduos durante o beneficiamento de rochas ornamentais, principalmente, no corte de mármore e granitos, Santos *et al* (2021) estudaram o aproveitamento de resíduos advindos do corte de granito em blocos de concreto. Foram incorporados os resíduos em proporções de 10%, 20% e 40% como substituinte ao aglomerante, como alternativa sustentável.

As matérias-primas utilizadas na produção de blocos de concreto foram: o cimento Portland CP II F 32 – RS, o resíduo de granito destorroado e seco em estufa a 105 ± 5° C e peneirado a 0,42 mm, e uma areia de granulometria grossa seca em estufa e peneirada a 4,0mm. A análise granulométrica foi realizada através ensaios de peneiramento para a areia, ensaio de determinação do módulo de finura para o cimento e difração a laser para o resíduo. Para a caracterização dos materiais foram realizados ensaios para determinação de massa

unitária e específica, de análise química por fluorescência de raios x, de caracterização mineralógica por difração de raios x e de microscopia eletrônica de varredura (SANTOS *et al.*, 2021).

A partir da análise granulométrica determinou-se o coeficiente de uniformidade e de concavidade, e concluiu-se que a areia se classificou em muito uniforme e o resíduo apresenta uma uniformidade média. Já em relação a concavidade, a areia enquadrou-se como mal graduado e o resíduo como bem graduado. A composição química mostra o resíduo com maiores teores de SiO₂ (48,67%), CaO (19,67%), Fe₂O₃ (14,5%) e K₂O (10,92%), a areia apresenta alta percentagem de SiO₂ (85,01%) e o cimento maior proporção o CaO (81,23%). Pela análise mineralógica observou-se características típicas do granito, como maior presença de feldspato, quartzo e biotita. Através do ensaio de massa específica real e aparente, observou-se que o resíduo de granito (DA – 1,19 ± 0,1 e DR – 3,27) é mais leve que o cimento (DA – 1,07 ± 0,2 e DR – 2,55) e a areia (DA – 1,52 ± 0,1 e DR – 2,62), dificultando a compactação dos blocos (SANTOS *et al.*, 2021).

A produção dos corpos de provas foi através da mistura manual dos três materiais e moldados em formas cilíndricas de 20 cm de diâmetro e 40 cm de altura, cerca de quatro blocos foram desmoldados e confinados por 28 dias para realização da cura. Posteriormente, foram realizados ensaios de caracterização nos blocos, determinaram-se a tensão de ruptura à compressão, absorção de água e massa específica aparente. Para formulação do bloco após algumas tentativas usou-se a proporção do traço 1:3 para incorporação do resíduo, sendo 2 kg de cimento, 6 kg de areia e 720 ml de água, pois nessa proporção obtiveram os melhores resultados na caracterização dos blocos com resistência igual a 4,4 MPa e absorção de água 4,4% (SANTOS *et al.*, 2021).

Nessa formulação de 1:3 foram incorporados resíduos nas proporções de 10, 20 e 40 % como substituto do cimento, sendo que, ao analisar a resistência, observou-se que os materiais incorporados com o resíduo obtiveram uma queda na resistência e uma maior absorção de água, proporcionalmente. Contudo os blocos apresentaram uma resistência maior que 3MPa, classificando-se em blocos da classe “C” com ou sem função estrutural podem ser indicados para alvenaria interna acima do nível do solo. A partir dos resultados, concluiu-se que podem ser substituídos até 10% do cimento por resíduo sem percas das propriedades e em até 20% mesmo com a dificuldade de compactação devido a granulometria fina do resíduo (SANTOS *et al.*, 2021).

4.7.3 Cerâmica de revestimento

A semelhança das propriedades químicas e físicas entre os materiais que compõe a massa cerâmica e diversos resíduos industriais, torna viável o uso destes resíduos como matéria-prima na produção de cerâmica. Caetano *et al.* (2021) estudaram a produção de cerâmica de revestimento através de resíduos de caulim, granito e porcelanato.

As amostras coletadas foram secas em estufa a 60° C e peneiradas em malha de abertura de 35# e caracterizadas através das técnicas de difração de raios x, fluorescência de raios x, termogravimétrica e análise térmica diferencial e granulometria a laser (CAETANO *et al.*, 2021).

Através das análise mineralógica, foi averiguado que o resíduo granítico apresenta em sua composição quartzo (SiO₂), mica (KA₁₂(Si₃Al) O₁₀(OH, F)₂), anortita (feldspato cálcico, CaAlSi₃O₈) e magnesioblenda (Ca₂(Mg,Fe⁺²)₄Al(Si₇Al)O₂₂(OH,F)₂). Pela análise química, foi observado que o granito apresenta altos teores de SiO₂ (59,65%), Al₂O₃ (12,72%), Fe₂O₃(11,16%) e CaO (3,07%), K₂O (0,67%), Na₂O (2,91%), Outros (2,45%) e perda de fogo (1,25%). A granulometria apresentou um diâmetro médio de 31,76µm, e uma distribuição granulométrica monomodal. Pela análise termogravimétrica e térmica diferencial, notou-se pequenos picos endotérmico à 560°C, relacionado a alteração alfa-beta do quartzo, e a 660 e 760°C associados a desidroxilação e recristalização da mica, nessa ordem, e uma banda de 840 a 950° supostamente referente à decomposição do carbonato de cálcio (CAETANO *et al.*, 2021).

O alto teor de sílica está associado ao quartzo em sua composição e os altos teores de óxidos de ferro e cálcio podem estar associados aos insumos utilizados nos processos de beneficiamento. O uso destes resíduos com essa composição na produção de cerâmicas pode influenciar na coloração avermelhada, devido ao teor de óxido de ferro, contudo estes oxidantes são grandes aliados a fundição destes materiais (CAETANO *et al.*, 2021).

Para a produção dos corpos de provas foram realizadas combinações de diferentes resíduos de acordo com a quantidade de óxido em cada tipo de material residual. Foram corrigidos o teor de umidade para 8% e conformação por prensagem uniaxial com carga de 3 toneladas. Os corpos de prova foram secos em estufa a 100 ± 5°C durante 24 horas e queimados a uma taxa de 10°C/min e sinterizados nas temperaturas de 1000, 1100 e 1150 °C por 30 minutos. Após sinterização foram submetidos a ensaios de análise tecnológicas e físico-mecânicas de absorção de água, perda ao fogo, retração linear, tensão de ruptura e flexão em três pontos com a finalidade de avaliar as peças cerâmicas com a massa residual

agregada, além destes ensaios, realizou-se também difratometria de raios x e microscopia eletrônica de varredura (CAETANO *et al.*, 2021).

A porcentagem em peso do resíduo do granito associado aos outros resíduos foi de 33,3 %, 30 %, 25 %, 20 %, 30,10 % na construção dos corpos de prova. Foi observado uma gradativa redução de absorção de água de acordo com o aumento da temperatura de sinterização. A resistência apresentou uma elevação de acordo com o aumento da temperatura, nas concentrações de 30 e 25 % de granito e os índices de resistência apresentaram maiores valores nas temperaturas de 1100 e 1150°C, associada a presença de anortita e mica em quantidades elevadas neste resíduo. Nas análises de difratometria de raio x nos corpos de prova, nas formulações com maior porcentagem de resíduos de granito apresentou resultados com maior presença de quartzo e feldspato cálcico, que podem atuar como fundentes aumentando a resistência mecânica. Nas formulações com 30 % e 25 % em peso de granito a 1150°C os corpos de prova apresentaram maior quantidade de poros, podendo estar associado a maior quantidade de quartzo e pela granulometria dos demais resíduos associados (CAETANO *et al.*, 2021).

Os melhores resultados foram nas concentrações de 30, 25 e 20 % de massa residual granítica sinterizadas a 1150°C, tendo uma boa absorção de água e maior resistência mecânica. Nesse estudo foram formulados a mistura de diferentes resíduos para a produção de massa cerâmica, e a partir disso conclui-se que as combinações destes resíduos apresentam propriedades apropriadas para o uso como matéria-prima em revestimentos cerâmicos (CAETANO *et al.*, 2021).

4.7.4 Agricultura

Além do uso de resíduos em diversos ramos da construção civil, uma prática crescente é o uso de resíduos industriais na agricultura. Dos Santos *et al.* (2021) caracterizaram e estudaram o uso de resíduo provenientes de duas rochas graníticas serradas em tear multifio na produção de mudas de tomateiro. As rochas ornamentais utilizadas nesse estudo foram o Granito Ocre Itabira e o Granito de Preto São Gabriel, avaliadas de acordo com a evolução das características agrônômicas com o uso do resíduo como substrato.

Os resíduos coletados no beneficiamento foram secos em estufa a $70 \pm 5^\circ\text{C}$, destorroado em peneiras com abertura de 0,84 mm e quarteados para obtenção de duas frações de massas, aproximadamente iguais. Uma das frações foi submetida a análise granulométrica através do granulômetro a laser, e a outra fração foi moída em um almofariz com pistilo para

torna-se passante em peneira de 0,105mm. Parte da segunda fração foram caracterizadas quimicamente por fluorescência de raios x e a porção não utilizada foi solubilizada em água, na proporção de 1:1 em peso, para verificação do pH (DOS SANTOS *et al.*, 2021).

Pela análise granulométrica notou-se que os resíduos apresentam uma granulometria fina com diâmetros entre 0,002 mm e 0,04mm, para a aplicação agrícola o material mais fino apresentará uma melhor solubilidade no substrato. Através dos ensaios de caracterização, o resíduo de Ocre Itabira apresentou teores de SiO₂ (69,90%), Al₂O₃ (17,0%), Na₂O (5,50%), K₂O (3,40%), P₂O₅ (0,14%), CaO (1,50 %) e Fe₂O₃ (1,30%) em maiores proporções, e apresentou pH igual a 8,4 e a soma das bases igual a 0,55%. E o resíduo de Preto São Gabriel demonstra teores semelhantes de SiO₂ (47,20 %), Al₂O₃ (19,30%), MgO (6,10%), Na₂O (3,50%), K₂O (1,20%), P₂O₅ (2,0%), CaO (7,10 %) e Fe₂O₃ (9,60%), assim como o pH igual a 8,9 e a soma das bases igual a 0,5% (DOS SANTOS *et al.*, 2021).

Ao observar as características dos dois resíduos, notou-se que o resíduo de Ocre Itabira em relação a granulometria apresentou melhores resultados, por se tratarem de partículas finas. Já em relação a composição química ambos os resíduos são semelhantes, entretanto o resíduo Preto São Gabriel apresentou melhor soma de bases tornando-o rico em macronutrientes, por apresentar alto teor de P₂O₅ e concentração de K₂O maior que 1% e a soma das bases (CaO, MgO e K₂O) maior que 9% torna-se um remineralizador eficaz. Ambos os resíduos apresentaram pH acima de 8, mostrando a alcalinidade, sendo grandes aliados ao metabolismo químico do solo (DOS SANTOS *et al.*, 2021).

Alguns parâmetros agronômicos foram avaliados nas mudas incorporadas com os resíduos, e para cada tipo de rocha observou-se comportamentos distintos. Foram incorporados resíduos nas proporções de 0, 5, 10, 15, 25, 50 e 100% ao substrato comercial, para o parâmetro de comprimento da parte aérea para cada porcentagem foi observado diferentes comprimentos para o resíduo Ocre Itabira e nas porcentagens de 50 e 100% a concentração em maior teor de resíduo influenciou negativamente. E para o resíduo de Preto São Gabriel esse mesmo parâmetro os resultados não foram positivos nas concentrações de 0, 5 e 100% (DOS SANTOS *et al.*, 2021).

Outro parâmetro observado foi o comprimento da raiz, para o resíduo de Ocre Itabira até 25 % o comportamento não mudou, contudo nas porcentagens de 50 e 100% houve um aumento da concentração e influenciou negativamente o crescimento da raiz. E esse mesmo parâmetro observado com o resíduo Preto São Gabriel não houveram divergências, apenas na concentração com 10%, apresentando assim uma menor variação e melhores resultados (DOS SANTOS *et al.*, 2021).

Outro fator analisado foi o diâmetro do colete para o substrato associado ao resíduo Preto São Gabriel não mudou diante das concentrações diferente do resíduo Ocre Itabira que a cada percentual apresentou diâmetros diferentes. As medidas de massa fresca apresentaram melhores resultados no resíduo Preto São Gabriel nas concentrações de 10, 15 e 100 %, para a massa fresca aérea nas porcentagens de 10 a 50%, para massa seca na parte aérea de 10 a 50% e para a massa seca da raiz de 10 a 15%. Os fatores de massa fresca com o resíduo de Ocre Itabira foram melhores nos percentuais de 0 e 10 %, para a massa fresca na parte área foram de 0 e 5%, para a massa seca na parte aérea e da raiz os valores decaíram, proporcionalmente, ao aumento da concentração do resíduo (DOS SANTOS *et al.*, 2021).

Em relação ao índice de qualidade de desenvolvimento, a partir de 10% foi averiguado uma variação entre os resultados dos resíduos. Constatou-se que até 5% de concentração de ambos os resíduos os resultados foram constantes, com o aumento da concentração os resultados apresentam divergências entre as médias dos parâmetros, podendo estar associado a composição mineralógica dos resíduos. De acordo com os parâmetros agrônômicos o resíduo Preto São Gabriel apresentou melhores resultados sendo promissor o seu uso no plantio de mudas incorporado ao substrato comercial (DOS SANTOS *et al.*, 2021).

5 CONCLUSÃO

A partir dos resultados dos ensaios de caracterização e da análise bibliográfica foi possível concluir as seguintes considerações:

— Com a caracterização mineralógica através do MEV/EDS, foi observado a presença de elementos químicos como silício, sódio, potássio, alumínio e oxigênio em maiores proporções. E pode-se inferir a presença dos minerais albita e zircão. E com a análise macroscópica da rocha de origem do resíduo, pode-se constatar que a rocha se trata de um monzogranito com minerais de quartzo (31%), feldspato potássico (25%), plagioclásio (35%), biotita (5%), epídoto (3%) e muscovita (1%).

— A caracterização física do resíduo demonstrou resultados condizentes a amostra de resíduo de granito. A umidade do material apresentou baixo teor, aproximadamente, 1%. A massa específica real em média $2,52 \text{ g/cm}^3$ próxima aos valores das densidades dos minerais componentes da rocha granítica e a massa específica aparente $1,074 \text{ g/cm}^3$.

— Observado a análise granulométrica, pode-se perceber que o amostra se classifica em um material fino, tendo maiores proporções de areia fina (18,76%), silte (64,37%) e argila (12,02%). Com essa granulometria, o material assemelha-se a granulometria de matérias-primas utilizadas na produção de peças cerâmicas.

— A caracterização térmica da amostra apresentou comportamento térmico estável, não apresentando perda de massa significativa para a baixa temperatura analisada.

— Por meio da pesquisa bibliográfica com foco no maior aproveitamento de resíduos de rocha granítica, pode-se sugerir o uso deste resíduo na incorporação para a produção de materiais como cerâmica vermelha, blocos de concreto, cerâmica de revestimento e na agricultura.

— A partir da análise bibliográfica foi possível constatar semelhanças entre o resíduo deste estudo e o resíduos utilizados por pesquisadores nestas aplicações, contudo para efetivar o uso do resíduo caracterizado neste trabalho, torna-se necessário a incorporação e a submissão de estudos tecnológicos específicos para viabilizar o uso destes produtos.

REFERÊNCIAS

- ABIROCHAS – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS. **Balanco das Exportações e Importações Brasileiras de Rochas Ornamentais em 2020**. Informe Janeiro/ 2021. Disponível em: <https://abirochas.com.br/wp-content/uploads/2021/02/Informe-01_2021-Balanco-2020.pdf> Acesso em: 22 fev. 2022.
- ALENCAR, Carlos Rubens Araújo. **Manual de caracterização, aplicação, uso e manutenção das principais rochas comerciais no Espírito Santo: rochas ornamentais**. Instituto Euvaldo Lodi-Regional do Espírito Santo. Cachoeiro de Itapemirim/ES: IEL, 2013.
- ALMEIDA, Phillipe Fernandes de. **Estudo comparativo do polimento de granitos com diferentes tipos de abrasivos**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 52/03. **Agregado Miúdo – Determinação da Massa Específica e Massa Específica Aparente**. Rio de Janeiro. 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004/04. **Resíduos sólidos - Classificação**. Rio de Janeiro: ABNT. 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10007/87. **Amostragem de Resíduos**. Rio de Janeiro. 1987
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15012/13. **Rochas para revestimento de edificações – Terminologia**. Rio de Janeiro: ABNT. 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS; NBR 7181/84: **Solo-Análise Granulométrica**. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.
- BANDEIRA, L.L.B.; CASSIMIRO, F.C.; ULIANA, A.K.; ALLEDI, C.T.D.B.; GALDINO,A.G.S. **Avaliação da adição de resíduo do corte de rochas ornamentais em massa cerâmica utilizada na indústria da cerâmica vermelha**. Revista Ifes Ciência, v. 4, n. 2, 2018.
- BRASIL. **Agência Nacional de Mineração**. Sumário Mineral / Coordenação Geral Marina Marques Dalla Costa, Karina Andrade Medeiros e Thiers Muniz Lima. Brasília: ANM, 2019.
- CABELLO, M. L. R. **Reciclagem de resíduo gerado na extração de quartzito**. Tese de doutorado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 172p. 2011.
- CABELLO, M. L. R.; PERES, A. E. C.; MARTINS, A. H.; SILVA, R. G. O.; PEREIRA, C.A. **Métodos de lavra aplicados à extração de rochas ornamentais/Mine layouts and extraction technologies in dimension stone exploitation**. *Holos*, v. 28, n. 5, p. 167, 2012.
- CAETANO, A. L. A.; MARQUES, V.C.; DE MACHADO, D.A.; FERREIRA, H.S.; DUTRA, R.P.S.; MENEZES, R.R.N. **Obtenção de cerâmica de revestimento sustentável desenvolvida com resíduos industriais**. *Cerâmica Industrial*, v. 26, n. 1, p. 1-11, 2021.

CAMARA, Guilherme de Resende; FAITANIN, Bruna Xavir, SILVEIRA, Leonardo Luiz Lyrio da; CHIODI FILHO, Cid; SANTOS, Elton Souza dos. **Utilização de rochas ornamentais ricas em minerais potássicos como fonte alternativa de insumo agrícola via rochagem**: Parte I. 2021.

CAMPOS, Antonio Rodrigues; RIBEIRO, Roberto Carlos C.; CASTRO, Nuria F.; AZEVEDO, Hélio C. A.; CATTABRIGA, Leonardo. **Resíduos: tratamento e aplicações industriais**. In: Tecnologia de rochas ornamentais: pesquisa, lavra e beneficiamento. Vidal, F.V.; Azevedo, H.C.A.; Castro, N. F. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2014.

CAMPOS, Antonio Rodrigues; CASTRO, Nuria Fernández; VIDAL, Francisco W. Hollanda; BORLINI; Mônica Castoldi. **Tratamento e aproveitamento de resíduos de rochas ornamentais e de revestimento, visando mitigação de impacto ambiental**. CETEM/MCTI, 2009.

CARLETE, B. A., CASTRO, N. F., SILVA, H. V. **Caracterização de agregados minerais provenientes de resíduos grosseiros de rochas ornamentais**. In: Jornada de Ictiação Científica, 24. Rio de Janeiro. Anais. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2016.

CHAVES, A.P., **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios**, Volume 1, 2 Ed., São Paulo: Signus Editora, 2002.

CHIODI FILHO, Cid. **Balço das Exportações e Importações Brasileiras de Rochas Ornamentais em 2020**. Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais – ABIROCHAS, Belo Horizonte –MG, 2021.

CHIODI FILHO, Cid. **O setor brasileiro de rochas ornamentais**. Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais–ABIROCHAS, Brasília, 2018.

COMEXSTAT. Setorial em Comex - **Rochas Ornamentais, divulgado pelo Centro Internacional de Negócios (CIN), da FIEC**. Outubro de 2021. Fortaleza – Ceará. Disponível em: < <https://arquivos.sfiec.org.br/cin/files/files/outubro-2021-mini estudo-rochas.pdf>.> Acesso em: 15 dez. 2021

CURI, Adilson. **Lavra de minas**. Oficina de Textos, 2017.

DA SILVA, André Araujo Alves. **Gestão de resíduos na indústria de rochas ornamentais, com enfoque para a lama abrasiva**. 2011.

DE OLIVEIRA MENEZES, Sebastião. **Rochas: manual fácil de estudo e classificação**. Oficina de Textos, 2013.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER- ME 093/94: **Solos - Determinação da densidade real**: DNER, 1994.

DOS SANTOS, Elton Souza; DE OLIVEIRA CARVALHO, Arnaldo Henrique; DE RESENDE CAMARA, Guilherme. **Caracterização e uso de resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais na produção de mudas de tomateiro**. Brazilian Journal of Development, v. 7, n. 9, p. 91482-91498, 2021.

FRASCÁ, Maria Heloisa Barros de Oliveira. **Tipos de rochas ornamentais e características tecnológicas**. In: Tecnologia de rochas ornamentais: pesquisa, lavra e beneficiamento. Vidal, F.V.; Azevedo, H.C.A.; Castro, N. F. P. 43 – 97. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2014.

KLEIN, Cornelis & DUTROW, Barbara. **Manual de ciência dos minerais**. Cornelis Klein, Barbara Dutrow; tradução e revisão técnica: Rualdo Menegat; 23Ed. Porto Alegre: Bookman, 2012.

MATHIELO, J.G.; JÚNIOR, A.C.; BONAMICO, E.A.; JÚNIOR, U.L.G. **Produção Limpa e Riscos Ambientais**. ABIROCHAS, 2019. Disponível em: < <http://cms.academia.darocha.com.br/wp-content/uploads/2019/08/5d653e1aa76ae.pdf>. > Acesso em: 25 fev. 2022

MATTOS, Irani Clezar. **Uso/adequação e aplicação de rochas ornamentais na construção civil**. Fortaleza – Ceará. Senai/CE e Pós Graduação IGCE – UNESP. 2000. Disponível em: < http://www.sfipec.org.br/sindicatos/simagran/artigos_palestras/Uso_Adequacao1.htm.> Acesso em: 14 mar. 2022

MOREIRA, Beatriz Carvalheira; NEVES, Mirna Aparecida; PINHEIRO, Matheus Marcolongo; NASCIMENTO, Wenderson Abreu Rosa; BARBOSA, Jeruza Lacerda Benincá; HORN, Adolf Heinrich. **Depósitos de resíduos de rochas ornamentais: Composição, dimensionamento e possíveis usos no setor de construção civil**. Geosciences, Geociências, v. 40, n. 02, p. 525-538, 2021.

MOREIRA, J. M. S.; FREIRE, M. N.; HOLANDA, J. N. F. **Utilização de resíduo de serragem de granito proveniente do estado do Espírito Santo em cerâmica vermelha**. Cerâmica, v. 49, n. 312, p. 262-267, 2003.

SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A. **Tratamento de minérios: práticas laboratoriais**. CETEM/MCT, 2007.

SANTOS, Karolyne Vieira; OLIVEIRA, Hebert Alves de; CALDAS, Leonardo Santos; SANTOS, Rhayra Guadalupe Melo. **Estudo para reaproveitamento de resíduo de corte de granito em blocos de concreto**. Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental, v. 10, n. 3, p. 277-292, 2021.

SANTOS, Max M. Aguiar; DESTEFANI, A. Z.; HOLANDA, J. N. F. **Caracterização de resíduos de rochas ornamentais provenientes de diferentes processos de corte e beneficiamento**. Matéria (Rio de Janeiro), v. 18, p. 1442-1450, 2013.

SILVEIRA, Leonardo Luiz Lyrio da; VIDAL, Francisco Wilson Hollanda; SOUZA, Júlio César. **Beneficiamento de rochas ornamentais**. CETEM/MCTI, 2014.

Streckeisen, A.L. Classification and Nomenclature of Igneous Rocks. N. Jahrb. Miner. Abh., 107, 144-240. 1976.

VIDAL, F. W. H., AZEVEDO, H. C. A., CASTRO, N. F. (Eds). **Tecnologia de rochas ornamentais: pesquisa, lavra e beneficiamento**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2013.