

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Construção Civil

Camila Maria Pereira Scalabrini

**INFLUÊNCIA DOS RESÍDUOS DE ROCHAS ORNAMENTAIS DE DIFERENTES
NATUREZAS EMPREGADOS COMO ADIÇÃO MINERAL NAS PROPRIEDADES
DE ARGAMASSAS ESTRUTURAIS**

Belo Horizonte
2025

Camila Maria Pereira Scalabrini

**INFLUÊNCIA DOS RESÍDUOS DE ROCHAS ORNAMENTAIS DE DIFERENTES
NATUREZAS EMPREGADOS COMO ADIÇÃO MINERAL NAS PROPRIEDADES
DE ARGAMASSAS ESTRUTURAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Construção Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Mestra em Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. White José dos Santos

Coorientadora: Profa. Dra. Maria Teresa Paulino Aguilar

Belo Horizonte
2025

S281i

Scalabrini, Camila Maria Pereira.

Influência dos resíduos de rochas ornamentais de diferentes naturezas empregados como adição mineral nas propriedades de argamassas estruturais [recurso eletrônico] / Camila Maria Pereira Scalabrini. - 2025.

1recurso online (121 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: White José dos Santos.

Coorientadora: Maria Teresa Paulino Aguilár.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Inclui bibliografia.

1. Construção civil - Teses. 2. Materiais de construção - Teses.
3. Rochas ornamentais - Teses. 4. Granito - Teses. 5. Mármore - Teses.
6. Resíduos da construção civil - Teses. I. Santos, White José dos.
II. Aguilár, Maria Teresa Paulino. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 691(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL


FOLHA DE APROVAÇÃO

INFLUÊNCIA DOS RESÍDUOS DE ROCHAS ORNAMENTAIS DE DIFERENTES NATUREZAS EMPREGADOS COMO ADIÇÃO MINERAL NAS PROPRIEDADES DE ARGAMASSAS ESTRUTURAIS


CAMILA MARIA PEREIRA SCALABRINI

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Construção Civil, como requisito para obtenção do grau de MESTRE EM CONSTRUÇÃO CIVIL, área de concentração Tecnologia na Construção Civil e linha de Pesquisa em Materiais em Construção Civil.

Aprovada em 23 de outubro de 2025, pela banca constituída pelos membros:

Documento assinado digitalmente
 WHITE JOSE DOS SANTOS
Data: 23/10/2025 18:08:57-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. White José dos Santos (Orientador) – PPGCC/UFMG


Documento assinado digitalmente
 MARIA TERESA PAULINO AGUILAR
Data: 23/10/2025 20:31:21-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^ª. Dr^ª. Maria Teresa Paulino Aguilar (Coorientadora) – PPGCC/UFMG


Dayana Cristina Silva
Garcia:10303489600

Assinado de forma digital por Dayana
Cristina Silva Garcia:10303489600
Dados: 2025.10.29 20:51:31 -03'00'

Prof^ª. Dr^ª. Dayana Cristina Silva Garcia – PPGCC/UFMG

Documento assinado digitalmente
 BRUNA SILVA ALMADA
Data: 31/10/2025 08:31:25-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^ª. Dr^ª. Bruna Silva Almada – PPGECC/UFC

Documento assinado digitalmente
 LOURDES MARIA SILVA DE SOUZA
Data: 03/11/2025 09:00:00-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^ª. Dr^ª. Lourdes Maria Silva de Souza – DEC/PUC-Rio

Belo Horizonte, 23 de outubro de 2025.

Dedico este trabalho a Deus, à minha família e aos meus amigos que sempre me apoiaram e incentivaram na busca por novos conhecimentos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à minha família que sempre me apoiou em todas as minhas decisões me dando forças para seguir pelos inesperados caminhos da vida. Em especial aos meus pais, Letícia e Jorge, que propiciaram as melhores condições de vida para eu chegar onde estou hoje. Minha mãe que, além de tudo, sempre me incentivou no desenvolvimento intelectual. Ao meu irmão, Luiz Felipe, e meu pai, Jorge, que compartilham comigo os estresses e as alegrias da vida. Aos meus tios e tias, em especial à minha tia Leonidia, madrinha de coração, que me apoia incondicionalmente. Ao meu padrinho, José Luiz, sempre disposto a me ajudar nesta pesquisa, mas que, infelizmente, partiu inesperadamente antes que eu pudesse compartilhar com ele meus aprendizados e minha conquista. À minha sogra Eliana por todo apoio emocional e pelo incentivo. Às minhas amigas e cunhadas Luiza e Laura, meu cunhado Pedro e sua esposa Thais, por me instigarem sempre a crescer intelectualmente. Ao Chico e a Serena, que com seu amor incondicional me dão energia para continuar.

Ao meu companheiro de vida Paulo, com quem escolhi compartilhar as aventuras da vida. Meu cúmplice e parceiro nas brincadeiras e jogos, que traz alegria no meu viver, me ensinando coisas novas a cada dia, me amparando nos momentos de estresse e tristeza, me dando forças e vibrando comigo a cada vitória. E que, para além de tudo isso, se tornou meu auxiliar nos laboratórios da engenharia e foi crucial para que eu conseguisse realizar esta pesquisa.

Aos meus amigos, que, além dos benefícios da amizade, sempre me apoiam e me incentivam a evoluir intelectualmente. Em especial, aos meus amigos professores e doutores Pedro Valle Salles e Flávia Cristina Silveira Braga, que me ajudaram compartilhando seus conhecimentos e ensinamentos, com pequenas orientações que foram cruciais para esta pesquisa. Em especial também, aos meus amigos Edgardo Moreira Neto, Carolina Rosa Pereira, Clarissa Saporì Avelar, Joyce Godoy e Ana Carolina que estão sempre me auxiliando nos momentos difíceis da vida e me estimulando a crescer profissional e mentalmente.

Agradeço ao Douglas Jose de Souza Ferreira, da Pedras Decorbel, pelo auxílio na coleta dos resíduos, sua ajuda foi fundamental para a viabilização desta pesquisa.

Ao meu orientador, professor Dr. White José dos Santos, pelos conhecimentos transmitidos, pela paciência e cuidado nas orientações. Agradeço pela disponibilidade e pela confiança que depositou em mim e na minha capacidade de desenvolver este trabalho. Agradeço também à minha coorientadora, professora Dra. Maria Teresa Paulino Aguilar, pelos conhecimentos disponibilizados e pelas contribuições no desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço a todos os professores do Mestrado da UFMG pelos ensinamentos. Em especial, à professora Dra. Dayana Cristina Silva Garcia e ao professor Dr. Fernando do Couto Rosa Almeida, que me ajudaram nos laboratórios, com os equipamentos, com os conhecimentos transmitidos e que foram essenciais nesta pesquisa. Agradeço também aos responsáveis pelos laboratórios de Concreto, Ricardo e Dedé, e de Metais, Leonardo, por todo auxílio durante a execução dos experimentos. Agradeço às instalações do Laboratório de Materiais Inovadores Sustentáveis (LAB-MIS) do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) que contribuiu para a obtenção dos resultados apresentados.

Agradeço ao meu sócio, Luiz Afonso, que compartilha comigo os sucessos profissionais e os estresses do dia a dia, sempre me apoiando nos momentos abstrusos e vibrando nas conquistas.

E a Deus que, na forma como ele seja, possibilita que tudo isso possa acontecer.

O meu muito obrigada a todos, sem vocês esta pesquisa não seria possível.

RESUMO

O Brasil destaca-se como uma das principais potências mundiais na exportação e no beneficiamento de rochas ornamentais; entretanto, entre 20 e 30% desse volume transforma-se em resíduo. Quando incorporados a matrizes cimentícias, esses resíduos podem atuar como filler. Diante desse contexto, este estudo teve como objetivo avaliar o desempenho individual de três resíduos oriundos da lama de sedimentação do beneficiamento de rochas ornamentais de diferentes naturezas (granito, mármore e pedra São Tomé) quando utilizados como adição mineral em argamassas estruturais. Os resíduos foram devidamente caracterizados, e as argamassas tiveram suas propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade analisadas. Os resultados indicaram que a incorporação dos resíduos de rochas ornamentais proporcionou melhorias na maioria dos parâmetros avaliados. A porosidade aberta apresentou reduções de 29,7%, 28,0% e 21,2% nas argamassas com adição de resíduos de pedra São Tomé, mármore e granito, respectivamente, em comparação à argamassa de referência. A absorção por capilaridade apresentou reduções mais expressivas de 37,0% e 22,7% nas argamassas com resíduos de pedra São Tomé e mármore. De forma semelhante, a absorção de água total foi significativamente reduzida, com decréscimos de 31% para a pedra São Tomé, 30% para o mármore e 22% para o granito. A profundidade de carbonatação das argamassas contendo resíduos de rochas ornamentais mostrou-se bastante reduzida, com valores inferiores a 0,4 mm. Quanto à penetração de cloretos, observou-se uma melhora de 35,5% nas argamassas com resíduo de mármore, 44,9% nas com granito e 47,7% nas com pedra São Tomé. A resistência à compressão aos 98 dias foi semelhante para todas as argamassas, apresentando valores próximos a 70 MPa. Similar à tração na flexão aos 98 dias que atingiu aproximadamente 8 MPa. Concluiu-se que a origem dos resíduos exerce influência significativa no desempenho das argamassas estruturais quando utilizados como adição mineral, com maior impacto nas propriedades físicas e de durabilidade. Destaca-se o resíduo de pedra São Tomé, ainda pouco explorado na literatura científica, que apresentou os melhores resultados.

Palavras chave: resíduo de rocha ornamental; granito; mármore; pedra São Tomé; adição mineral; argamassa estrutural.

ABSTRACT

Brazil stands out as one of the world's leading powers in the export and processing of ornamental stones; however, between 20 and 30% of this production is converted into waste. When incorporated into cementitious matrices, these wastes can act as fillers. Within this context, this study aimed to evaluate the individual performance of three waste derived from the sedimentation sludge of ornamental stone processing of different natures (granite, marble and São Tomé stone) when used as a mineral addition in structural mortars. The wastes were properly characterized, and the mortars were assessed in terms of their physical, mechanical and durability properties. The results indicated that the incorporation of ornamental stone waste led to improvements in most of the parameters evaluated. Open porosity was reduced by 29.7%, 28.0% and 21.2% in mortars containing São Tomé stone, marble and granite waste, respectively, compared to the reference mortar. Capillary water absorption showed more pronounced reductions of 37.0% and 22.7% in mortars with São Tomé stone and marble wastes. Similarly, total water absorption was significantly reduced, with decreases of 31% for São Tomé stone, 30% for marble and 22% for granite. The carbonation depth of mortars containing ornamental stone wastes was markedly low, with values below 0.4 mm. Regarding chloride penetration, improvements of 35.5% were observed in mortars with marble waste, 44.9% in those with granite waste and 47.7% in those with São Tomé stone waste. Compressive strength at 98 days was similar for all mortars, with values close to 70 MPa, as was flexural strength at 98 days, which reached approximately 8 MPa. It is concluded that the origin of the waste significantly influences the performance of structural mortars when used as a mineral addition, with a greater impact on physical and durability-related properties. Emphasis is given to the São Tomé stone waste, which is still scarcely explored in the scientific literature and presented the best overall results.

Keywords: ornamental rock waste; granite; marble. São Tomé stone; mineral addition; structural mortar.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Volume de Exportação de Rochas Ornamentais Brasileiras	19
Figura 2 – Volume (em toneladas) de resíduo gerado nos últimos oito anos considerando a faixa de 20% e 30% de resíduo gerado.	21
Figura 3 – Etapas primárias de beneficiamento: Extração (a) e corte (b) de Blocos de Granito na Jazida	22
Figura 4 – Formas do resíduo de rochas ornamentais: sólido em filetes (a) e lama depositados em lagoas ou bacias de deposição	23
Figura 5 – Composição Química de resíduos de Pedra São Tomé	28
Figura 6 – Composição Química de resíduos de Mármore (Parte 1/2)	29
Figura 7 – Composição Química de resíduos de Mármore (Parte 2/2)	30
Figura 8 – Composição Química de resíduos de granito	31
Figura 9 – Composição Química de resíduos misturados (Parte 1/2).....	32
Figura 10 – Composição Química de resíduos misturados (Parte 2/2).....	33
Figura 11 – Tipos de resíduos utilizados na Literatura Científica de um total de 85 artigos estudados.....	41
Figura 12 – Quantidade de estudos com aplicação de resíduo de rochas ornamentais para cada tipo de compósito cimentício em 85 estudos coletados.....	42
Figura 13 – Formas de aplicação dos resíduos de rocha ornamental na literatura científica de um total de 85 estudos da Literatura Científica	43
Figura 14 – Compósitos estudados na Literatura Científica com o resíduo de rocha ornamental como adição mineral, total de 26 estudos da Literatura Científica que utilizam como adição mineral	43
Figura 15 – Quantidade de estudos da Literatura Científica para cada tipo de resíduo de rocha ornamental utilizada como adição mineral a dosagem em Concretos Autoadensáveis.....	44
Figura 16 - Fluxograma do programa experimental	52
Figura 17 – Resultados DRX dos materiais.....	63
Figura 18 – Distribuição granulométrica acumulada e diferencial do cimento e MGSR	65
Figura 19 – Imagens de MEV das partículas do MGSR e do cimento (100 µm)	67
Figura 20 - Imagens de MEV da superfície das partículas dos resíduos e do cimento (20µm).....	69

Figura 21 - Imagens de MEV da superfície das partículas dos resíduos e do cimento (10µm).....	70
Figura 22- Compilação dos resultados do Método dos Mínimos Quadrados (MMQ)	72
Figura 23 - Resultados do coeficiente de capilaridade.....	76
Figura 24 - Resultados da absorção de água por capilaridade	76
Figura 25- Resultados do ensaio de absorção de água por imersão	77
Figura 26- Resultados do ensaio de porosidade aberta.....	79
Figura 27- Resultados de massa específica	79
Figura 28- Resultados da porosidade total das amostras	80
Figura 29 – Imagem dos corpos de prova carbonatados após aspensão da solução de fenolftaleína.....	83
Figura 30 – Ampliação de uma das imagens dos corpos de prova Controle com carbonatação interna.....	84
Figura 31 – Profundidade de carbonatação registrada por material.....	84
Figura 32 – Imagem dos corpos de prova após aspensão de nitrato de prata e exposição a luz apresentando a indicação das medidas de penetração de cloretos efetuadas.....	86
Figura 33 – Resultado da mensuração de penetração de cloretos	87
Figura 34- Resultados do ensaio de resistência a compressão	88
Figura 35- Resultados do ensaio de resistência à tração na flexão	90
Figura 36- MEV das amostras de argamassas (ampliação 500x).....	92
Figura 37- Mapeamento EDS das amostras com adição de pedra São Tomé	93
Figura 38- Mapeamento EDS das amostras com adição de granito	93
Figura 39- Mapeamento EDS das amostras com adição de mármore.....	94
Figura 40- EDS em linha das argamassas.....	95

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Composição Mineralógica de resíduos de pedra São Tomé	36
Quadro 2 – Composição Mineralógica de resíduos de mármore	37
Quadro 3 – Composição Mineralógica de resíduos de granito.....	37
Quadro 4 – Composição Mineralógica de resíduos misturados.	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Caracterização física de resíduos de Lama de sedimentação de mármore.....	25
Tabela 2 – Caracterização física de resíduos de Lama de sedimentação de granito.	26
Tabela 3 – Caracterização física de resíduos de Lama de sedimentação de rochas misturadas.....	27
Tabela 4 – Caracterização física de resíduos de Lama de sedimentação de pedra São Tomé.....	28
Tabela 5- Composição química dos resíduos e do cimento (%)	61
Tabela 6 - Diâmetros D ₁₀ , D ₅₀ e D ₉₀ , Área superficial específica e Porosidade do cimento e dos MGRS	65
Tabela 7 – Razão de Poisson	71
Tabela 8 – Registro do E (GPa)	71
Tabela 9 – Medidas ensaio de índice de consistência (<i>Flow Table</i>) para definição de dosagem de aditivo	73
Tabela 10 – Dosagens finais das amostras.....	73
Tabela 11 - Traço em gramas para a produção de 1m ³ de argamassa	73
Tabela 12 – Medidas ensaio de índice de consistência (<i>Flow Table</i>)	74

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/c Relação água-cimento

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas

NM ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas- Norma Mercosul

ASE Área Superficial Específica

CH Hidróxido de Cálcio - Portlandita

CNH Cimento Não Hidratado

CPV Cimento Portland tipo V

C-S-H Silicato de Cálcio Hidratado

DRX Difração de Raios-X

EDS Espectrometria de Energia Dispersiva

FRX Fluorescência de Raios-X

IPT Instituto de Pesquisa Tecnológica

LOI *Lost of Ignition* – Perda ao Fogo

MGSR Resíduo proveniente do beneficiamento de rochas ornamentais

MEV Microscopia de Varredura por Elétrons

UFMG Universidade Federal de Minas Gerais

ZTI Zona de Transição Interna

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	18
3	ROCHAS ORNAMENTAIS	19
3.1	Tipos e características das rochas ornamentais	19
3.2	Resíduos de Rochas Ornamentais	21
3.3	Aproveitamento em compósitos cimentícios	40
3.4	Considerações finais sobre a revisão bibliográfica	50
4	MATERIAIS E PROGRAMA EXPERIMENTAL	52
4.1	Materiais	53
4.2	Etapa 1: Caracterização dos resíduos e matérias primas	53
4.3	Etapa 2: Dosagem	54
4.4	Etapa 2: Ajustes dos traços e moldagem das amostras	55
4.5	Etapa 3: Propriedades no Estado Endurecido	55
5	RESULTADOS E ANÁLISES	61
5.1	Etapa 1: Caracterização dos materiais	61
5.1.1.	Caracterização química e mineralógica	61
5.1.2.	Caracterização física	64
5.1.3.	Morfologia das partículas	69
5.2	Etapa 2: Dosagem dos materiais	71
5.3	Etapa 3: Propriedades no estado endurecido	75
5.3.1.	Capilaridade	75
5.3.2.	Absorção de água, porosidade e massa específica	77
5.3.3.	Carbonatação acelerada	81
5.3.4.	Penetração de cloretos	85
5.3.5.	Resistencia a Compressão	88
5.3.6.	Resistência à tração na flexão	90
5.3.7.	Microestrutura	91
6	CONCLUSÕES	96
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99
8	APÊNDICES	107

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é uma das potências mundiais em extração e exportação de rochas ornamentais do mundo. De acordo com a ABIROCHAS (2025), as exportações de rochas ornamentais do 1º semestre de 2025 somaram US\$ 739 milhões, totalizando um volume 1,04 milhões de toneladas. Os principais produtos exportados compreendem chapas e blocos de rochas silicáticas (granitos e similares), quartzitos maciços, mármore, ardósia e pedra-sabão. EUA, China, Itália, México e Reino Unido, nesta ordem, representaram os cinco principais destinos das exportações, compondo 83% do total do faturamento brasileiro. Os cinco principais estados exportadores incluíram, nesta ordem, Espírito Santo, Minas Gerais, Ceará, Bahia e Rio Grande do Norte, que corresponderam por 97,9% do faturamento e 98,4% do volume físico das exportações brasileiras de 2024, sendo que deste percentual 92% é apenas dos estados do Espírito Santo e Minas Gerais somados.

A exploração e beneficiamento das rochas ornamentais geram quantidades abundantes de resíduo entre lama e outros, tais como areias e fragmentos de rochas. Aproximadamente, 20% a 30% do volume de rochas ornamentais beneficiadas se transformam em resíduos em forma de lama (SINGH *et al.*, 2017) e até 80% de perda das rochas originais é causada nas etapas como corte e polimento (AZEVEDO *et al.*, 2019). A geração e descarte destes resíduos, sendo a maior parte destes resíduos depositados em aterros, geram graves ameaças ao meio ambiente, poluindo o solo e a água e, quando secos, transformando-se em uma fina poeira prejudicial à população (BACARJI *et al.*, 2013; GUPTA *et al.*, 2018).

Por outro lado, o concreto é um dos materiais mais versáteis e globalmente utilizados na construção civil (RAY *et al.*, 2021). É estimado que a indústria do concreto utilize anualmente 1,5 bilhões de toneladas de cimento, de 10 a 20 bilhões de toneladas de agregados e aproximadamente 1 bilhão de toneladas de água (RAY *et al.*, 2021; MARTINS *et al.*, 2022). A indústria do cimento consome muita energia e emite uma grande quantidade de CO₂ na atmosfera - cerca de 7% da produção de dióxido de carbono em todo o mundo (NASR *et al.*, 2020; OZKILIÇ *et al.*, 2023). Por esta razão, encontrar materiais alternativos para inserção em concretos e argamassas têm sido objeto de muitas pesquisas (MARTINS *et al.*, 2022). O aproveitamento de resíduos de rochas ornamentais (MGSR) em concretos e argamassas é uma boa

forma de mitigação dos impactos ambientais causados pela produção de cimento, extração de agregados e descarte dos resíduos (ALMADA *et al.*, 2023).

A aplicação de MGSR em compósitos cimentícios descritos na literatura científica varia em quatro formas: em substituição à areia (CHEN *et al.*, 2020; DOBISZEWSKA *et al.*, 2022), ao agregado graúdo (GENCEL, *et al.*, 2022), ao cimento (MUNIR *et al.*, 2017; KUMAR *et al.*, 2020; KASHYAP *et al.*, 2022; PEREIRA *et al.*, 2022; OZKILIÇ *et al.*, 2023; ALMADA *et al.*, 2023; ALMADA *et al.*, 2020) e como adição mineral (MARTINS *et al.*, 2022; KARIMIPOUR *et al.*, 2021; DANISH *et al.*, 2021; BOADELLA *et al.*, 2019). Os MGSR como adição mineral atuam como fillers podendo acelerar a hidratação do cimento, melhorar a zona de transição na interface pasta/agregado (ALMADA *et al.* 2023), melhorar a estrutura da zona de transição intersticial e influenciar positivamente o empacotamento e estabilidade das matrizes (PEREIRA *et al.*, 2022).

Os compósitos cimentícios estudados na literatura científica que utilizam os MGSR como adição mineral compreendem, em sua maior parte, concretos auto adensáveis (SADEK *et al.*, 2016; TOPÇU *et al.*, 2009; MARTINS *et al.*, 2022; KARIMIPOUR *et al.*, 2021; DANISH *et al.*, 2021; ELYAMANY *et al.*, 2014; ALYAMAC *et al.*, 2017; MEERA *et al.*, 2019; MEERA *et al.*, 2018; PEREIRA *et al.*, 2022; VALDEZ *et al.*, 2011), quatro em Concretos de alto desempenho (pode-se exemplificar com BOADELLA *et al.*, 2019 e EVRAM *et al.*, 2020) e dois em argamassas (LI *et al.*, 2018 e APOLINÁRIO *et al.*, 2014). Os estudos que avaliam a influência dos MGSR como adição mineral em argamassas de alto desempenho ou estruturais ainda estão pouco explorados.

Os resíduos de MGSR variam em função dos produtos beneficiados nas marmorarias (ALMADA *et al.*, 2023) e, assim, apresentam composições químicas e mineralógicas distintas. Sadek *et al.* (2016) e Karimipour *et al.* (2021), que estudaram resíduos de granito e mármore individualmente e Sadek *et al.* (2016), além desses, ainda avaliou com resíduos misturados, demonstram resultados distintos nas amostras em função do tipo de resíduo aplicado nos concretos autoadensáveis como adição mineral. A origem, o tipo e as características do resíduo apresentam efeitos significativos no seu comportamento no concreto (Sadek *et al.*, 2016). O impacto de melhoria do uso do resíduo de mármore foi maior do que o granito e o calcário no aumento da resistência à compressão (Karimipour *et al.*, 2021). Por outro lado,

ALMADA *et al* (2020) observou que a heterogeneidade dos resíduos não afetou significativamente as propriedades analisadas nas amostras estudadas. A partir da Literatura Científica examinada entende-se que se faz pertinente avaliar a influência do tipo de MGSR quando utilizados de forma pura provenientes de rochas ornamentais de diferentes naturezas nos compósitos cimentícios e considerar sua atuação como adição mineral ainda pouco explorada. Assim, esta pesquisa pretende compreender a influência do uso do resíduo de rochas ornamentais de diferentes naturezas, especificamente os resíduos provenientes da lama de sedimentação do processo de beneficiamento de mármore, granito e pedra São Tomé, quando utilizados separadamente como adição mineral, nas propriedades das argamassas estruturais.

2 OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo geral estudar o desempenho individualizado de três resíduos provenientes da lama de sedimentação do processo de beneficiamento de rochas ornamentais de naturezas distintas (Granito, Mármore e Pedra São Tomé) quando aplicados como adição mineral em argamassas estruturais.

Para alcançar o objetivo geral tem-se os seguintes objetivos específicos:

- Identificar o tipo de rocha, entre as três estudadas, com maior potencial de aplicação;
- Avaliar a influência do tipo de resíduo de rocha ornamental na dosagem por empacotamento de partículas de argamassas de alta resistência;
- Estudar a influência do tipo de resíduo de rocha ornamental no comportamento das argamassas de alta resistência no estado fresco (coesão e demanda de aditivo redutor de água);
- Analisar a influência do tipo de resíduo de rocha ornamental no comportamento das argamassas de alta resistência no estado endurecido (propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade).
- Identificar os efeitos da aplicação de cada tipo de resíduo (Granito, Mármore e Pedra São Tomé) na zona de transição das argamassas estruturais.

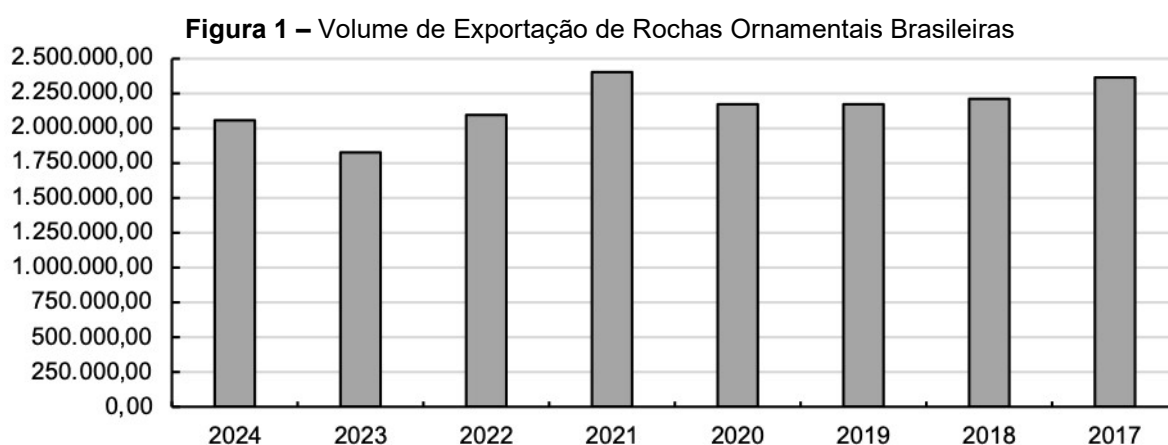
3 ROCHAS ORNAMENTAIS

Neste capítulo são apresentadas as características das rochas ornamentais estudadas e as informações referentes à forma e características dos resíduos (MGSR) gerados pela indústria de extração e beneficiamento de rochas ornamentais brasileira. Além disso, serão evidenciados os impactos ambientais causados por este processo e o estado da arte em relação ao aproveitamento do MGSR em matrizes cimentícias, com foco no uso como adição mineral. Para a elaboração deste capítulo foram realizadas pesquisas pelo portal do Periódico CAPES, na plataforma do Google Acadêmico e na infraestrutura da biblioteca da UFMG.

3.1 Tipos e características das rochas ornamentais

O Brasil encontra-se entre os cinco maiores produtores de rochas ornamentais do mundo. Aproximadamente, 10.000 empresas operam neste setor no Brasil, incluindo indústrias de mármore (61%), fábricas de mármore (61%), setores de processamento (20%), mineração (10%), exportadores (4%), serviços (3%), depósitos de placas (1%) e indústrias de máquinas, equipamentos e insumos (1%) (BRAGA *et al.*, 2023).

A indústria de rochas ornamentais brasileira, de acordo com os registros da ABIROCHAS (2025) dos respectivos anos, apresentou nos últimos 8 anos (de 2017 a 2024) um volume total de exportação de 17.253.107,20 toneladas, conforme demonstrado na Figura 1.



Fonte: Elaborado pela autora com dados extraídos de ABIROCHAS, 2025, acessado em 30/08/2025.

Os principais produtos exportados compreendem rochas silicáticas (granitos e similares), quartzitos maciços e mármore, ardósia e pedra-sabão, sendo Minas Gerais o segundo estado entre os principais exportadores (ABIROCHAS, 2025).

As rochas têm a sua formação tangenciada por diferentes processos geológicos em diferentes tipos de composição de base (COSTA, 2017). As formações são classificadas como Magmatismo (responsável pela formação de rochas ígneas, como granitos e basaltos), Sedimentação (responsável pelas rochas sedimentares como arenitos, calcários, dolomitos e folhelhos) e Metamorfismo (responsável pelas rochas metamórficas, tais como ardósias, xistos, mármore, quartzitos e gnáisses) (COSTA, 2017).

O termo mármore abrange todas as rochas carbonáticas, metamorfizadas (recristalizadas) ou não, que apresentam a calcita e/ou dolomita como seus principais constituintes, tendo-se padrões cromáticos normalmente definidos por minerais acessórios (ABIROCHAS, 2018). O termo granito refere-se a um amplo conjunto de rochas silicáticas granulares e compactas, de estrutura orientada ou não, formadas por diferentes associações de quartzo, feldspatos, micas, anfibólios e vários outros minerais acessórios (ABIROCHAS, 2018). Alguns dos minerais acessórios dos granitos são os Charnockitos (granitos verdes, como Ubatuba e Labrador), gabros (granitos negros, como São Gabriel), sienitos (como Azul Bahia e Ás de Paus), rochas gnáissico-migmatíticas (como Copacabana, CD, Black Taurus, Blue Wave, Golden Thunder), além das verdadeiras rochas graníticas (como Vermelho Capão Bonito, Cinza Mauá, Branco Ceará) (ABIROCHAS, 2018). A Pedra São Tomé é considerada um quartzito. Apresenta como seu principal componente o quartzo e é uma rocha de origem metamórfica formada a partir da recristalização de arenito.

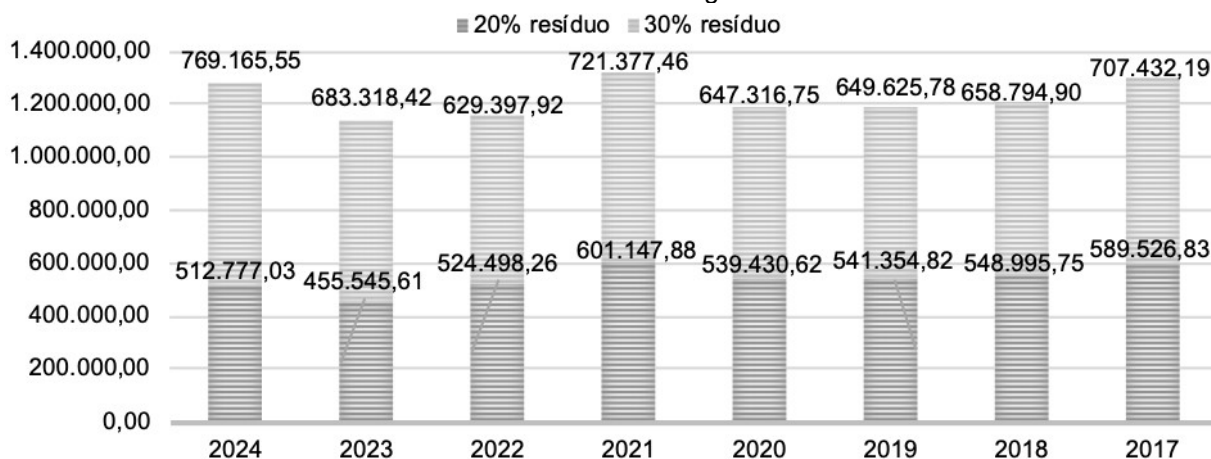
Neste sentido, é importante ressaltar que os termos comerciais utilizados para as rochas ornamentais não são exatamente os mesmos empregados pela classificação de rochas em geologia. Ou seja, existe uma variedade de minerais na classificação geológica em um mesmo grupo de rochas ornamentais com mesma nomenclatura comercial.

3.2 Resíduos de Rochas Ornamentais

A indústria de beneficiamento de pedras ornamentais gera até 80% de perda das rochas originais durante o processo de transformação de blocos brutos (extraídos em processos de jateamento) somados outras etapas como corte e polimento (AZEVEDO *et al.*, 2019). Os MGSR representam aproximadamente 58% da produção total da pedreira e da fábrica (MEDINA *et al.*, 2017). Durante o processo de beneficiamento das rochas, quando essas são cortadas em chapas de 20 mm de espessura, são gerados aproximadamente 20% a 30% de resíduos em forma de lama (SINGH *et al.*, 2017; ALYAMAÇ, *et al.*, 2017, ALIABDO *et al.*, 2014; BUYUKSAGIS *et al.*, 2017). E a quantidade de resíduos gerados por bloco desdobrado, cerca de 1/3 em peso seco ou 2/3 em peso úmido, são transformados em resíduo (BRAGA *et al.*, 2010).

Conforme dados dos últimos oito anos de volume de exportação de rochas ornamentais apresentados pela ABIROCHAS e as proporções de volume de resíduo gerado estabelecido pelas referências bibliográficas (SINGH *et al.*, 2017; MEDINA *et al.*, 2017; AZEVEDO *et al.*, 2019; BRAGA *et al.*, 2023), considerando de 20% a 30% de resíduo gerado, pode-se estimar os volumes anuais de resíduos gerados na indústria de exportação de rochas ornamentais brasileira ver Figura 2. Vale ressaltar que estes dados estão considerando apenas os dados de exportação, o volume de resíduos total gerado pela indústria brasileira de rochas ornamentais compreende também os volumes empregados dentro do país e não apenas as exportadas.

Figura 2 – Volume (em toneladas) de resíduo gerado nos últimos oito anos considerando a faixa de 20% e 30% de resíduo gerado.



Fonte: Elaborado pela autora com dados extraídos de ABIROCHAS, 2025, acessado em 30/08/2025.

O volume total de resíduos gerados nos últimos oito anos, considerando 20% a 30% de resíduos, corresponde a 4.313.276,80 a 5.466.428,95 de toneladas. Um volume importante de MGSR gerando impacto considerável tanto no ambiente como na saúde pública (BENJEDDOU *et al.*, 2013).

O processo de geração de resíduos de rochas ornamentais pode ser dividido em duas vertentes: a de extração e etapas primárias de beneficiamento (extração de blocos e corte / polimento de chapas) e uma outra proveniente do beneficiamento secundário de corte e polimento de peças finais (ALMADA *et al.*, 2023; MEDINA *et al.*, 2017). Normalmente, o processo relacionado às jazidas de extração dos blocos e tratamento de chapas correspondem as etapas primárias de beneficiamento e secundária são processadas pelas marmorarias locais que transformam as chapas em produtos de pedras ornamentais (ALMADA *et al.*, 2023).

Figura 3 – Etapas primárias de beneficiamento: Extração (a) e corte (b) de Blocos de Granito na Jazida



Fonte: Boadella *et al.*, 2019.

Os modos de beneficiamento de rochas ornamentais produzem dois formatos de resíduo em função de como as rochas são processadas: o resíduo sólido (pedaços de rochas menores ou filetes) e em forma de lama (uma mistura de pó de rocha com água) (BRAGA *et al.*, 2023).

Os resíduos finos (2–0,075 mm) e ultrafinos (< 0,075 mm) gerados na fase de corte e polimento das rochas ornamentais são chamados de lama abrasiva ou lama de processamento (BRAGA *et al.*, 2023) e, às vezes, de pó de pedra (CHEN *et al.*, 2020). Normalmente, os resíduos provenientes das marmorarias apresentam-se na forma de lama e sua composição varia de acordo com o tipo de pedra vendida e beneficiamento realizado (ALMADA *et al.*, 2023).

Figura 4 – Formas do resíduo de rochas ornamentais: sólido em filetes (a) e lama depositados em lagoas ou bacias de deposição



Fonte: Bacarji, E. *et al.*, 2013.

O descarte e deposição dos resíduos gerados na indústria de Rochas Ornamentais normalmente é feito em grande parte em aterros (PEREIRA *et al.*, 2022) e sob forma de lama com desaguamento em tanques de sedimentação (BRAGA *et al.*, 2010) ou lagoas. Esses resíduos podem contaminar as reservas hídricas superficiais e subterrâneas (BENJEDDOU *et al.*, 2013), interferem na permeabilidade do solo dificultando a recuperação dos aquíferos e a vida vegetal (MEDINA *et al.*, 2017) e apresentam impacto antagônico na fertilidade da terra (KUMAR *et al.*, 2020) com alteração da porosidade e aumento da alcalinidade do solo (ASHISH, 2018). Além disso, esses resíduos também podem se depositar superficialmente na flora e fauna locais acarretando a diminuição da transpiração, impactando negativamente nos processos metabólicos e dificultando o crescimento da vegetação (KUMAR. *et al.*, 2020), que, de forma mais ampla, conduzem à impactos no sistema ecológico (KUMAR *et al.*, 2020). Os MGSR também constituem um risco para a saúde humana devido ao pó de granulação extremamente fina (ASHISH, 2018) que provoca considerável contaminação do ar e gerando diversos problemas respiratórios, cutâneos e ópticos aos habitantes que residem naquela área (KUMAR. *et al.*, 2020).

Os MGSR tornaram-se um grande problema ambiental e preocupa dezenas de países (ALYAMAC *et al.*, 2017). Enquanto muitos países, como a Turquia, Irã, Itália, China, Índia, Espanha, Brasil, África do Sul, Portugal, o Paquistão, os EUA, o Egito e a Finlândia, exportam produtos de mármore, muitos outros países, como o Japão, Alemanha, Taiwan e Coreia do Sul, importam os (ALYAMAC *et al.*, 2017). A principal solução para evitar os riscos dos MGSR é reaproveitá-los para a produção de novos

produtos (BENJEDDOU *et al.*, 2013). De acordo com Castilho (2018) para a escolha de rochas ornamentais na utilização na construção civil se faz necessário o conhecimento da composição mineralógica e dos caracteres petrográficos, químicos e físico-mecânicos das mesmas. De acordo com Meyer, Artur e Navarro (2003) os materiais rochosos possuem comportamento tecnológico determinado por características intrínsecas e específicas a cada tipo rochoso.

Nas Tabelas de 1 a 4 a seguir foram apresentados os dados de caracterização física dos MGSR registrados na Literatura Científica. Os dados referem-se aos resíduos de Mármore (Tabela 1), Granito (Tabela 2), rochas ornamentais misturados (Tabela 3) e Pedra São Tomé (Tabela 4) obtidos da indústria de beneficiamento segundo os levantamentos coletados nos estudos da Literatura Científica.

A princípio entende-se que a granulometria deveria ser similar em função da forma de processamento e os tipos de rochas ornamentais, contudo, foram encontrados dimensionamentos variados, inclusive para área superficial específica (ASE). Percebem-se tipos distintos de resíduos de pedra com finuras diferentes dependendo de suas origens (CHEN *et al.*, 2020). Nota-se que a massa específica dos resíduos provenientes dos mármore apresenta uma variação de 2,12 a 3,11 g/cm³, dos granitos a variação é de 1,87 a 3,05 g/cm³, das rochas misturadas (com a menor variação) é de 2,27 a 2,92 g/cm³. A massa específica média calculada a partir dos dados levantados corresponde a 2,61 g/cm³ para os mármore, 2,53 g/cm³ para os granitos, 2,67 g/cm³ para a rochas misturas e pedra São Tomé 2,69 g/cm³. Em relação a ASE notam-se parâmetros distintos de mensuração com resultados variando entre os tipos de rochas avaliados. De maneira geral, os mármore apresentaram maiores ASE em relação as demais amostras de resíduos encontradas na Literatura. Em relação à pedra São Tomé, ainda pouco explorada, não foram encontrados estudos que apresentassem explicitamente a ASE ou a massa específica dos resíduos.

Assim, percebe-se que a origem da rocha tem relação direta com as características físicas do resíduo, mesmo estes sendo originados no mesmo processo de beneficiamento. Sabe-se que o efeito das misturas depende significativamente da distribuição do tamanho das partículas, bem como do formato das partículas e das características da superfície (ELYAMANY *et al.*, 2014). Assim como também diretamente relacionado a massa específica dos materiais. Neste sentido, a relevância

da caracterização física por tipo de rocha se faz pertinente para uma avaliação coerente da real interferência do tipo de rocha quando da aplicação dos MGSR em matrizes cimentícias.

Tabela 1 – Caracterização física de resíduos de Lama de sedimentação de mármore.

Fonte	Massa específica γ_r (g/cm ³)	Graulometria (μm)	Área Superficial Específica (m ² /Kg)
Aliabdo, A.A. <i>et al.</i> , 2014	2,50		3996 (Blaine)
Alyamac <i>et al.</i> , 2017	2,71	<125 μm	392
Ashish, D.K., 2018	2,21	-	332 (Blaine)
Barbosa <i>et al.</i> , 2018	2,91	<4,8mm	2,58 (Figure Module)
Benjeddou, E. <i>et al.</i> , 2013	2,65	65% entre 0 e 10 μm	9350 (Blaine)
Corinaldesi <i>et al.</i> , 2010	2,55	D ₉₀ = 50 μm D ₅₀ =7 μm	1500 (Método de Blaine)
Danish, P. <i>et al.</i> , 2021 - Revisão	2,12 a 2,71	-	8889 (Blaine) e 5100-5250 (modulo de finura)
Elyamany, H.E. <i>et al.</i> , 2014	-	Passante peneira No.200 (125 μm)	-
Evrarn, A. <i>et al.</i> , 2020	2,70	<300 μm	-
Gencel, O. <i>et al.</i> , 2022	2,69	5–22 mm	-
Kabeer, K.I.S.A. <i>et al.</i> , 2018	2,70	<1.18 mm D ₅₀ =49,68 μm	350
Karimipour, A. <i>et al.</i> , 2021	2,69	-	558
Kashyap, V.S. <i>et al.</i> , 2022	2,63	Passante peneira 90 μm	364
Kumar, V. <i>et al.</i> , 2020	2,32	-	2,14 (módulo de finura)
Li, L.G. <i>et al.</i> , 2018	2,70 (Densidade relativa)	<150 μm	-
Mashaly <i>et al.</i> , 2015	2,67	D ₉₀ <50 μm D ₅₀ <11 μm	670 (Blaine)
Meera, M. <i>et al.</i> , 2018	2,54	D ₅₀ =10,21 μm	-
Mhamal, M.M. <i>et al.</i> , 2023	2,33	0,15<D ₅₀ <0,3	2,03 (módulo de finura)
Munir <i>et al.</i> , 2017	2,69	<45 μm	351 (Método de Blaine)
Nasr, M.S. <i>et al.</i> , 2020	-	Passante peneira 150 μm (Subs. cimento) e 0.15–1.18 mm (Subs. areia)	-
Palanisamy, P. <i>et al.</i> , 2022	2,45	-	-
Rodrigues, R. <i>et al.</i> , 2015	2,73 (Densidade Aparente)	2mm=84,2% 0,125mm=27,5% 0,063mm=16,8%	2150 (Blaine)
Sadek D.M. <i>et al.</i> , 2016	2,78	-	2420
Sardinha M. <i>et al.</i> , 2016	2,73	D ₉₀ < 2mm	215 (Blaine)
Seghir, N.T. <i>et al.</i> , 2018	2,74	D ₉₀ =80 μm D ₅₀ =30 μm D ₁₀ =5 μm	3869,46 (Blaine)
Singh. M. <i>et al.</i> , 2019	2,67	60%<300 μm	350
Singh. T. <i>et al.</i> , 2023	3,11	-	-
Song, W. <i>et al.</i> , 2022 - Amostra M0	2,21	-	2,46 m ² /g
Souza, L.G.M. <i>et al.</i> , 2017	-	D _{médio} = 27,32 μm D ₉₀ = 69,19 μm D ₅₀ =20,91 μm D ₁₀ =2,04 μm	-
Syarif, M. <i>et al.</i> , 2023	-	<200 μm	-
Topçu, I.B. <i>et al.</i> , 2009	2,47	-	614 (Blaine)
Valdez, P. <i>et al.</i> , 2011	-	Tamanho médio 4 μm	-
Varadharajan, S. <i>et al.</i> , 2020	2,64	Entre 0,5mm e 2,5mm	2,45 (Módulo de finura)
Xi, Y. <i>et al.</i> , 2019	-	Entre 0,5 μm e 80 μm	-

Fonte: Elaborado pela autora com os dados das fontes pesquisadas na literatura científica (Tabela completa inserida nos apêndices).

Tabela 2 – Caracterização física de resíduos de Lama de sedimentação de granito.

Fonte	Massa específica γ_r (g/cm ³)	Graulometria (μm)	Área Superficial Específica (m ² /Kg)
Allam M. E. <i>et al.</i> , 2014	-	Passante peneira no. 300 e Passante peneira 4.76.mm	-
Azevedo, A.R.G. <i>et al.</i> , 2019	1,87	-	-
Boadella, I.L. <i>et al.</i> , 2019	2,63	tamanho médio de partícula de 20 μm	-
Chen, J.J. <i>et al.</i> , 2020	2,77	0,071mm	-
Elyamany, H.E. <i>et al.</i> , 2014	-	Passante peneira No.200 (125 μm)	-
Gupta, L.K. <i>et al.</i> , 2018	2,46	0,189mm média	0,9 (Modulo de finura)
Jain, A. <i>et al.</i> , 2022	2,57	<4.75 mm	1,4 (Modulo de finura)
Karimipour, A. <i>et al.</i> , 2021	3,05	-	510
Karmegam, A. <i>et al.</i> , 2014	2,59	-	-
Medina <i>et al.</i> , 2017	-	-	1350 (BET)
Meera, M. <i>et al.</i> , 2019	2,37	D ₅₀ =12,82 μm	-
Mhamal, M.M <i>et al.</i> , 2023	2,23	0,6<D ₅₀ <1,18	3,7 (módulo de finura)
Nasr, M.S. <i>et al.</i> , 2021	-	Passante peneira 150 μm (Subs. cimento) e 0.15–1.18 mm (Subs. areia)	-
Palanisamy, P. <i>et al.</i> , 2022	2,58	-	-
Prokopski, G. <i>et al.</i> , 2020	-	<25mm	220-250
Sadek D.M. <i>et al.</i> , 2016	2,64	-	3040
Singh. S. <i>et al.</i> , 2016	2,62	-	2,573 (modulo de finura)
Singh. S. <i>et al.</i> , 2016	2,56	-	2,573 (modulo de finura)
Tangaramvong, S. <i>et al.</i> , 2021	2,60	<10mm	3,24 (modulo de funira)
Vijayalakshmi, M. <i>et al.</i> , 2013	2,39	55% < 150 μm 31% < 45 μm	351

Fonte: Elaborado pela autora com os dados das fontes pesquisadas na literatura científica (Tabela completa inserida nos apêndices).

Tabela 3 – Caracterização física de resíduos de Lama de sedimentação de rochas misturadas

Fonte	Tipo do Resíduo	Massa específica γr (g/cm³)	Graulometria (μm)	Área Superficial Específica (m²/Kg)
Almada <i>et al.</i> , 2023 - Amostra C1	Granito, Mármore, Quartzito, Cerâmicas, Porcelanatos, Ardósia e Pedra São Tomé	2,75	D90 = 1,5μm D50=13,2μm D10=50μm	-
Almada <i>et al.</i> , 2023 - Amostra C2	Granito, Mármore, Quartzito, Cerâmicas, Porcelanatos, Ardósia e Pedra São Tomé	2,69	D90 = 1,2μm D50=11,3μm D10=55,1μm	-
Almada <i>et al.</i> , 2023 - Amostra S1	Granito e Mármore	2,78	D90 = 1,6μm D50=10,3μm D10=41,4μm	-
Almada <i>et al.</i> , 2023 - Amostra S2	Granito e Mármore	2,79	D90 = 1,6μm D50=12μm D10=41,7μm	-
Almada <i>et al.</i> , 2023 - Amostra N1	Granito, Mármore, Porcelanato e Silestone	2,67	D90 = 1μm D50=9,9μm D10=45,6μm	-
Almada <i>et al.</i> , 2023 - Amostra N2	Granito, Mármore, Porcelanato e Silestone	2,70	D90 = 0,8μm D50=7,6μm D10=31,6μm	-
Apolinário, E. C. A., 2014	Mármore e Granito	2,92	D50=12μm	3540 (BET)
Bacarji, E. <i>et al.</i> , 2013 - Amostra A	Mármore e Granito	-	0,7 a 71	-
Bacarji, E. <i>et al.</i> , 2013 - Amostra B	Mármore e Granito	-	0,7 a 90	-
Bacarji, E. <i>et al.</i> , 2013 - Amostra C	Mármore e Granito	-	0,7 a 90	-
Braga, F.C.S. <i>et al.</i> , 2023	Mármore, Granito, Gnaiss e Calcário	-	<0,074mm	-
Cruz, A.C.F., 2019	Mármore e Granito	-	Dmáx = 75μm	-
Gado, R.A., 2022	Mármore e Granito	2,75	4,86μm	1250
Martins, M.A.B. <i>et al.</i> , 2022	Mármore e Granito	2,83	Dmáx = 300μm D50=30,8μm	0,12 (módulo de finura)
Mhamal, M.M. <i>et al.</i> , 2023	Mármore e Granito	2,27	0,3<D50<0,6	2,82 (módulo de finura)
Miltre, S.H.M., 2016 - RBRO G	Misturado (sem o tratamento térmico proposto no trabalho)	2,48	% Retido Peneira 200 (75μm) = 8,56 % Retido Peneira 325 (43μm) = 18,1	7277,8 (Blaine)
Miltre, S.H.M., 2016 - RBRO D	Misturado (sem o tratamento térmico proposto no trabalho)	2,53	% Retido Peneira 200 (75μm) = 3,08 % Retido Peneira 325 (43μm) = 7	6179,3 (Blaine)
Pereira, M.M.L. <i>et al.</i> , 2022	Mármore e Granito	2,62	D90 = 39,09μm D50=10,51μm D10=1,28μm	-
Sadek D.M. <i>et al.</i> , 2016	Misturado (Mármore e Granito)	2,74		3840
Segadães, A.M. <i>et al.</i> , 2005	Mármore e Granito	-	Tamanho médio 23 μm	-
Soares, 2014	Misturado	2,53	D90 = 39,22μm D50=11,37μm	6179,3 (Blaine)
Sousa, A.A.P. <i>et al.</i> , 2022	Misturado	-	62.71%<44 μm	-
Souza, L.G.M. <i>et al.</i> , 2017	Mármore e Granito	-	Dmédio = 13,64μm D90 = 31,64μm D50=9,78μm D10=1,48μm	-
Teixeira, F.R. <i>et al.</i> , 2021	Rochas Ornamentais (não específica)	2,64	D90 = 71,09μm D50=21,91μm D10=3,66μm	-

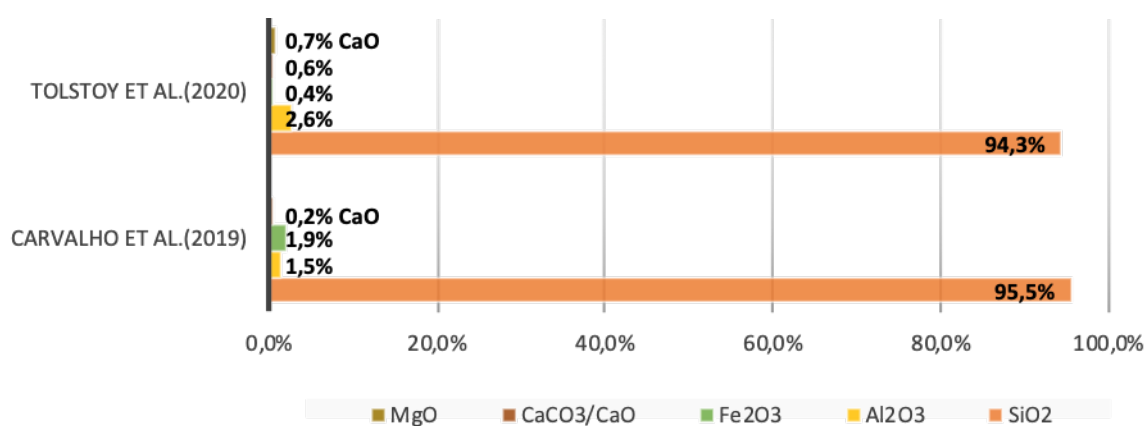
Fonte: Elaborado pela autora com os dados das fontes pesquisadas na literatura científica (Tabela completa inserida nos apêndices).

Tabela 4 – Caracterização física de resíduos de Lama de sedimentação de pedra São Tomé

Fonte	Caracterização física		
	Massa específica γ_r (g/cm ³)	Gravimetria (μ m)	Área Superficial Específica (m ² /Kg)
Carvalho, J.M.F.. <i>et al.</i> , 2019	2,74	De 2,4 a 12,5 mm	-
Junior, I.F.. <i>et al.</i> , 2019	-	D ₉₀ =300 μ m; D ₅₀ =150 μ m; D ₁₀ =45 μ m	-
Tolstoy, A. <i>et al.</i> , 2020	2,64	De 10-20mm 74,6%; de 5- 10mm 25%; <5mm 0,4%	-

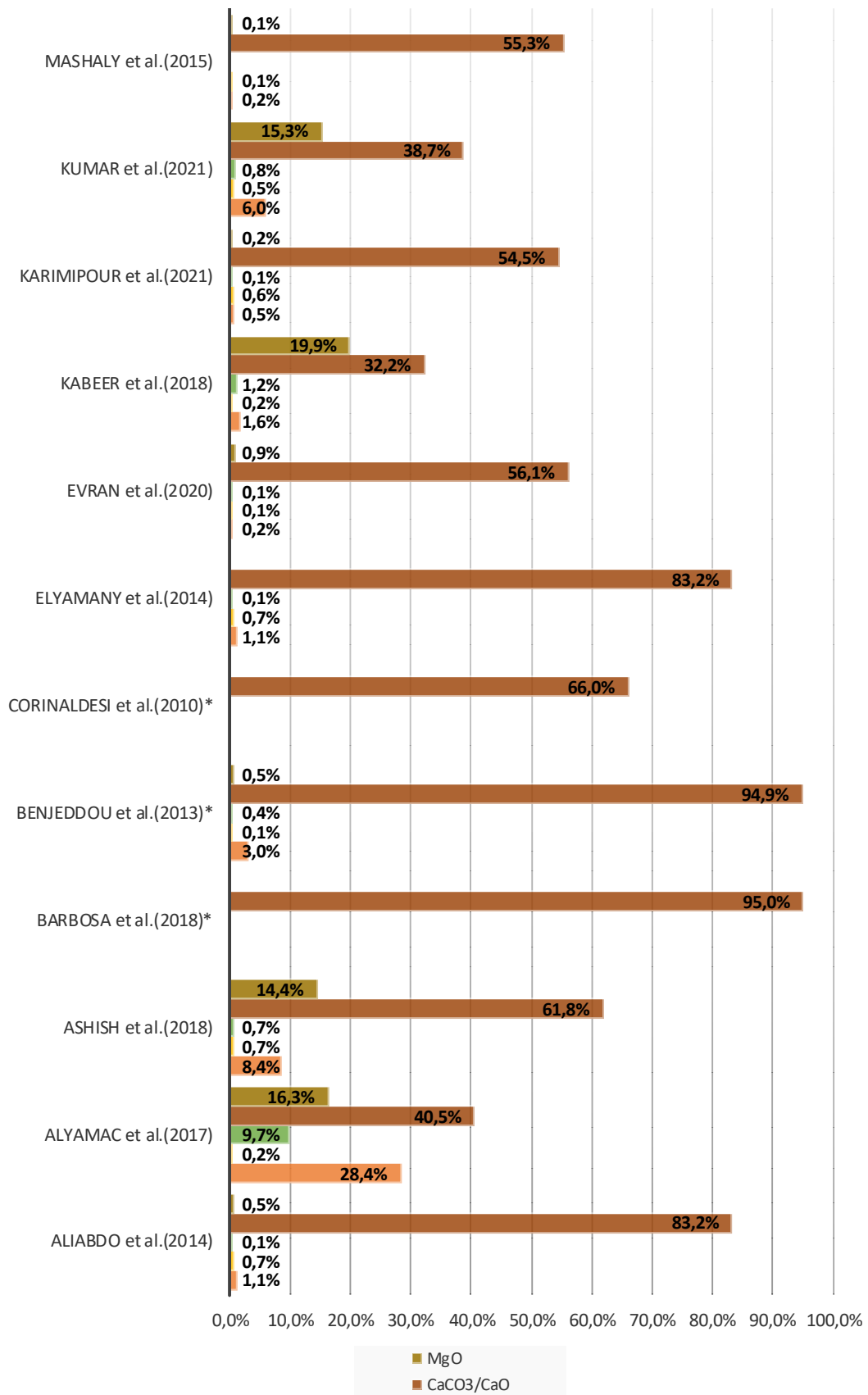
Fonte: Elaborado pela autora com os dados das fontes pesquisadas na literatura científica (Tabela completa inserida nos apêndices).

Em relação a composição química, os resíduos do processo de beneficiamento de rochas ornamentais, principalmente as lamas, apresentam esta composição variada em função da constituição das rochas e do processo de beneficiamento (BRAGA *et al.*, 2010). A seguir, apresentam-se os compostos químicos principais, em percentuais, dos MGSR registrados nos resultados de FRX na Literatura Científica, conforme as tabelas detalhadas inseridas nos Apêndices deste trabalho. Esta composição foi organizada em função do tipo de resíduo: pedra São Tomé (Figura 5), mármore (Figuras 6 e 7), granito (Figura 8) e outras rochas e/ou rochas misturadas (Figura 9 e 10).

Figura 5 – Composição Química de resíduos de Pedra São Tomé

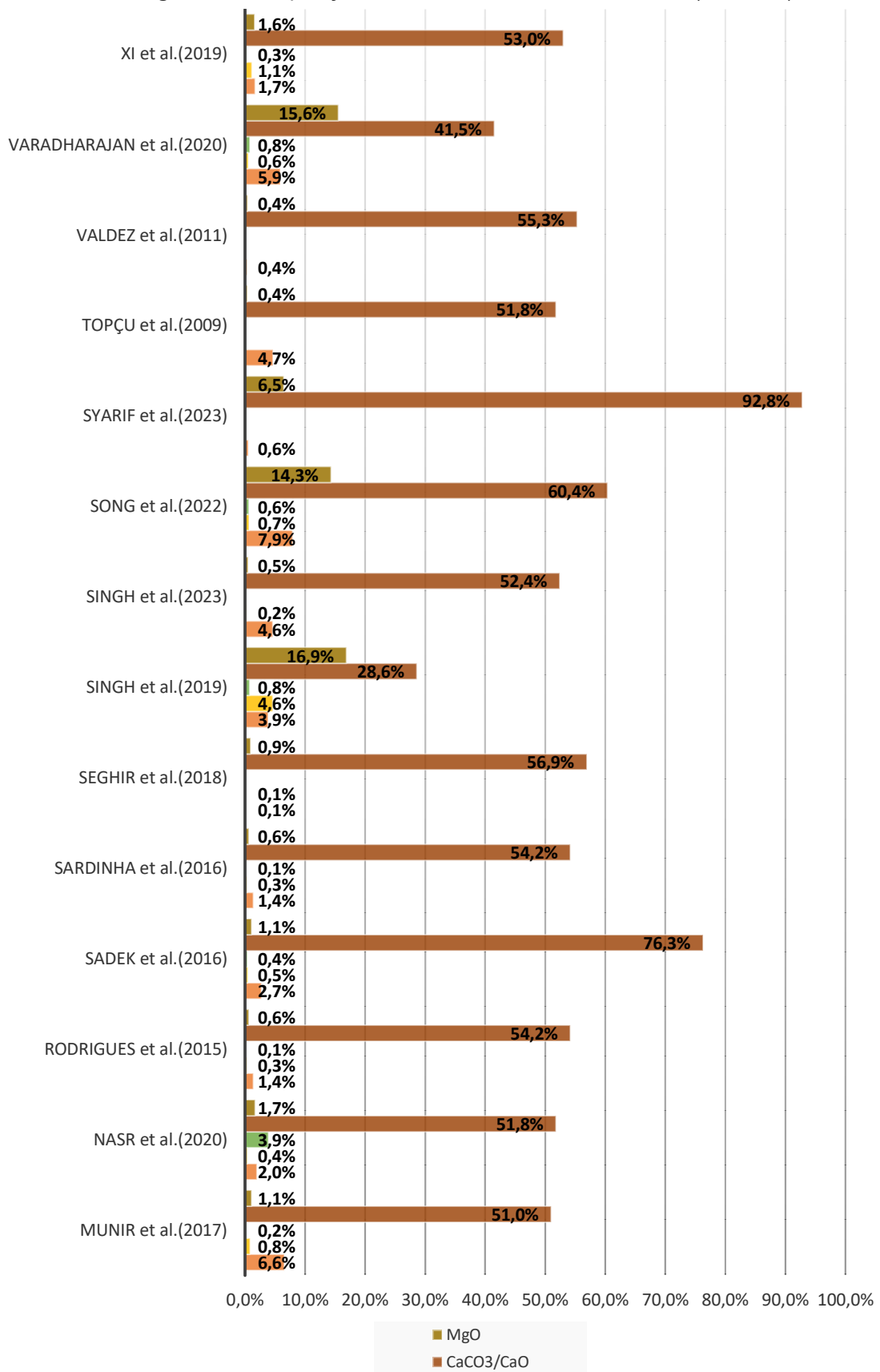
Fonte: Elaborado pela autora com base na bibliografia.

Figura 6 – Composição Química de resíduos de Mármore (Parte 1/2)



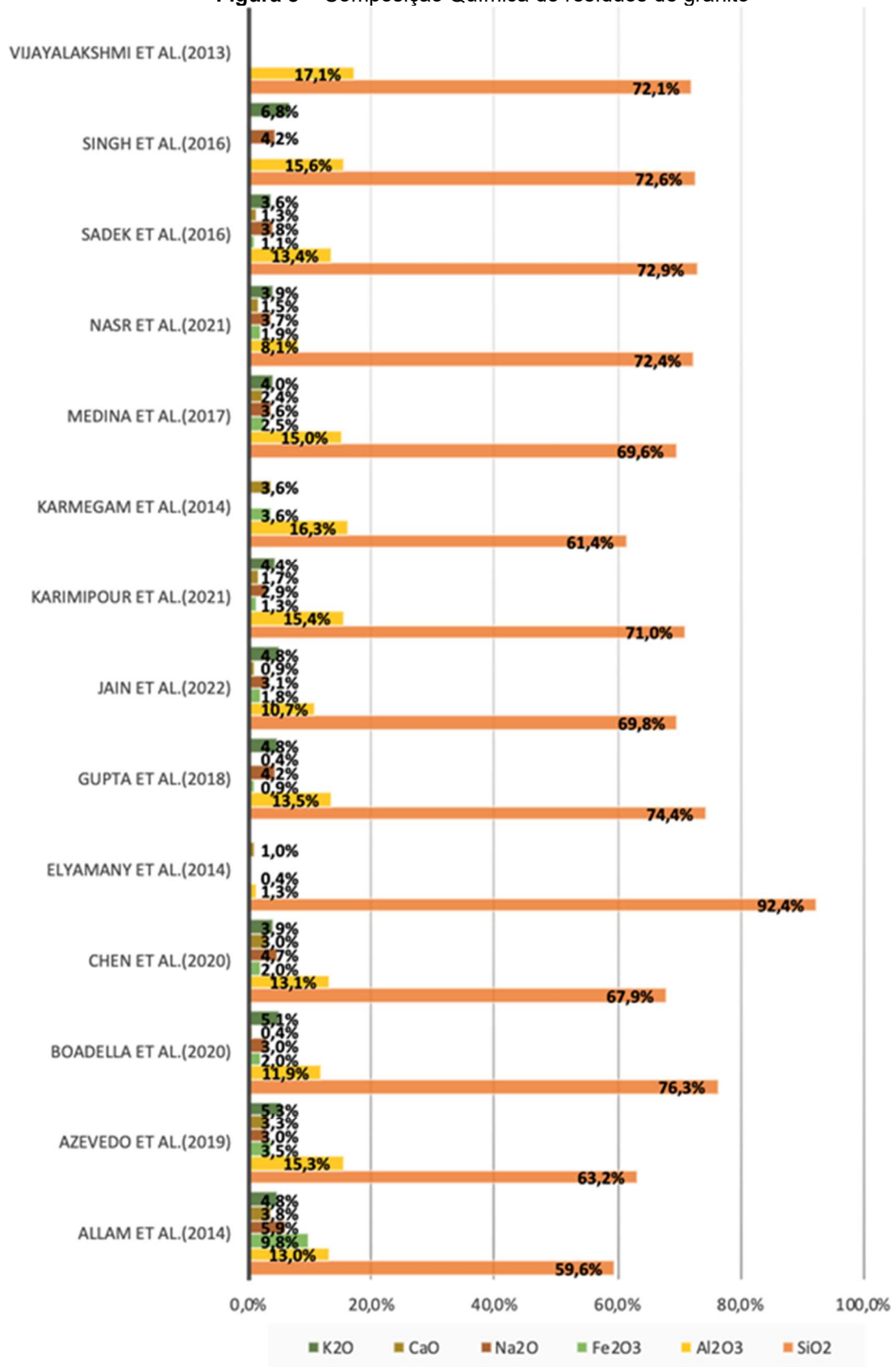
Fonte: Elaborado pela autora com base na bibliografia.

Figura 7 – Composição Química de resíduos de Mármore (Parte 2/2)



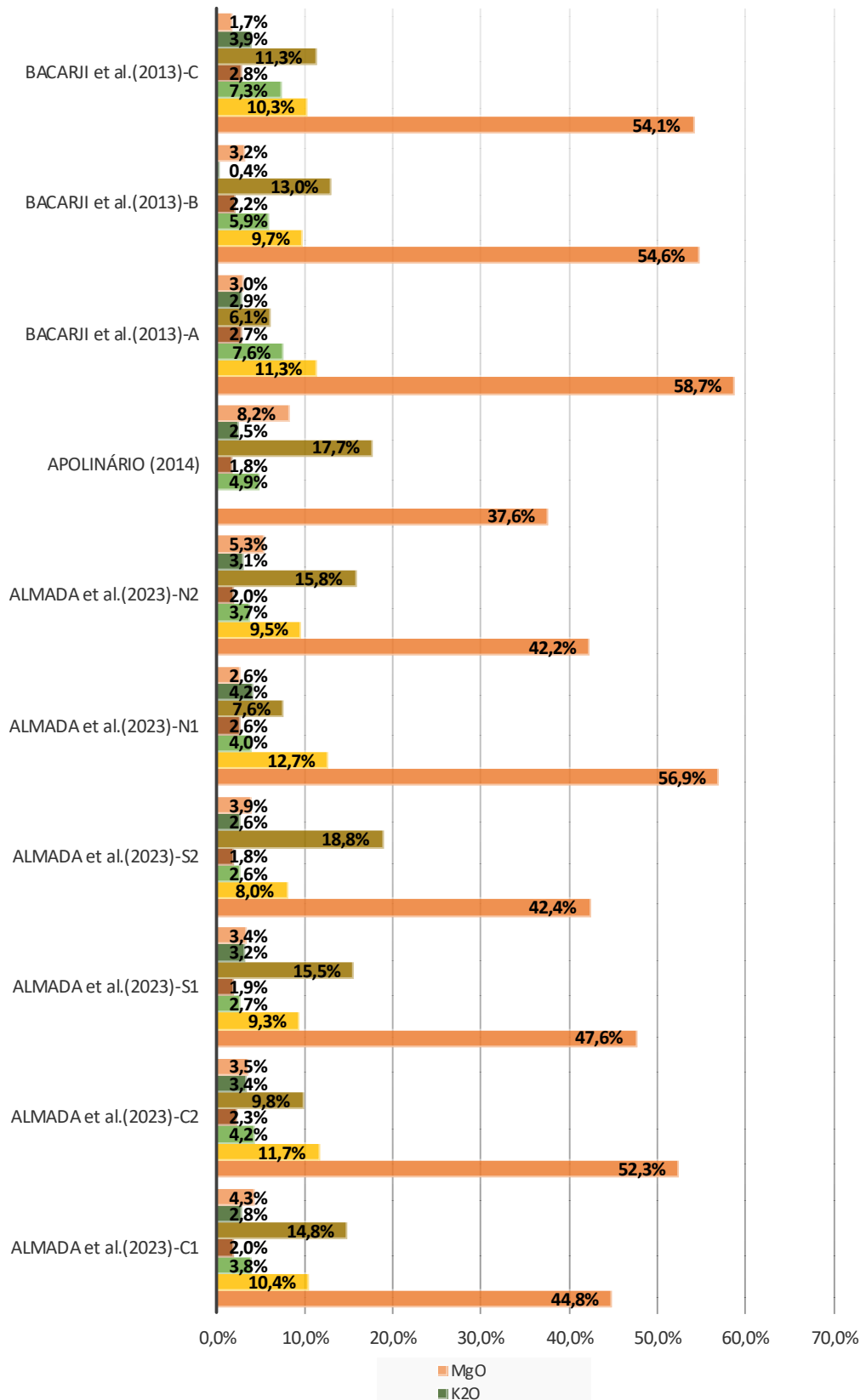
Fonte: Elaborado pela autora com base na bibliografia.

Figura 8 – Composição Química de resíduos de granito



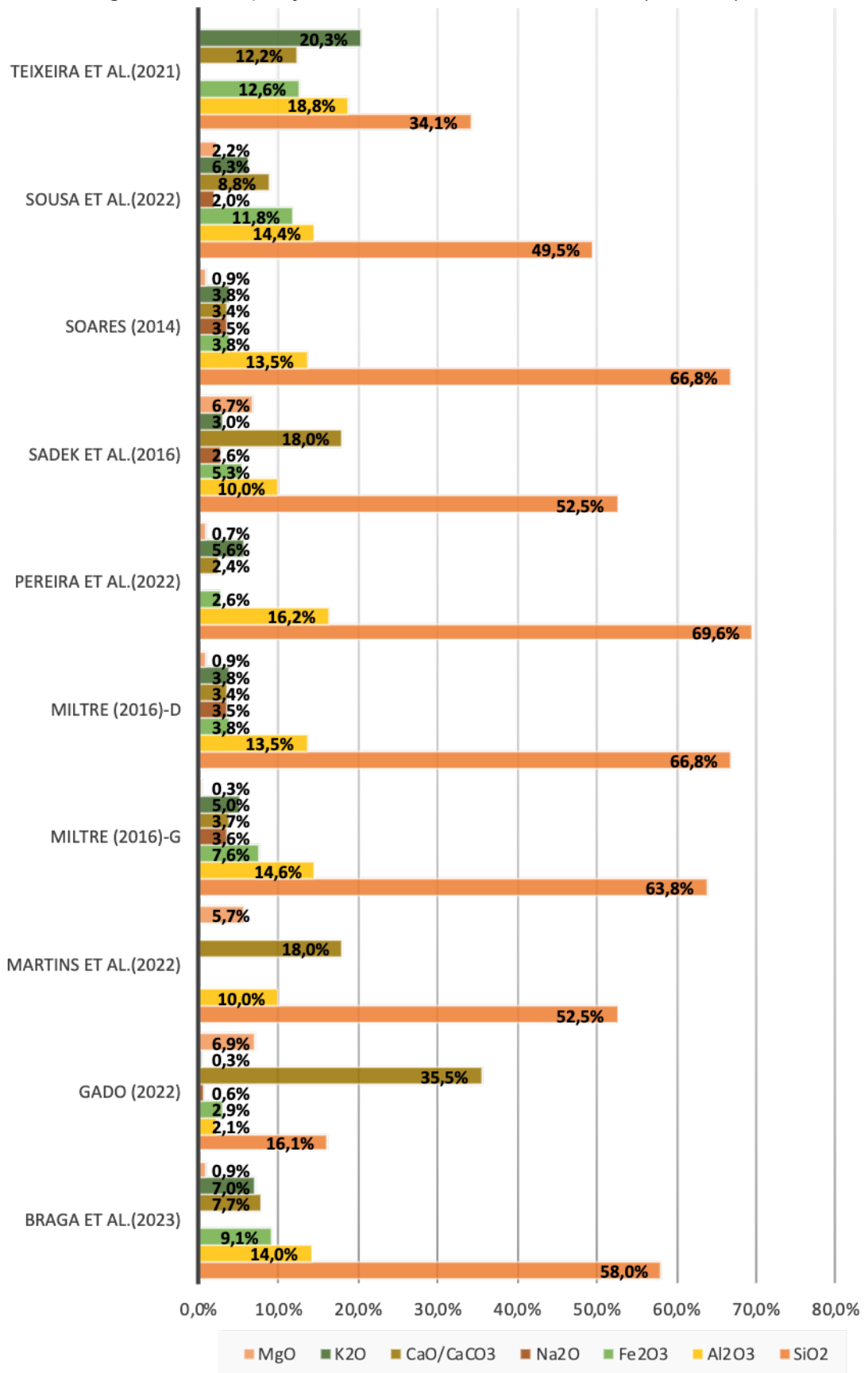
Fonte: Elaborado pela autora com base na bibliografia.

Figura 9 – Composição Química de resíduos misturados (Parte 1/2)



Fonte: Elaborado pela autora com base na bibliografia.

Figura 10 – Composição Química de resíduos misturados (Parte 2/2)



Fonte: Elaborado pela autora com base na bibliografia.

Em relação aos resíduos provenientes da Pedra São Tomé nota-se que apenas duas referências apresentam sua composição química. Um indício de que é uma rocha ainda pouco explorada na Literatura Científica. Para as duas referências, Carvalho, *et al.* (2019) e Tolstoy, *et al.* (2020), nota-se que a composição principal deste tipo de rocha compreende o SiO_2 (Dióxido de Silício). Sua composição química é quase que inteiramente representada por este composto químico.

Nos resíduos provenientes de mármore percebe-se que o composto químico mais evidente corresponde ao Óxido de Cálcio (CaO), sendo a proporção de menor quantia encontrada de 28,6% em SINGH *et al.* (2019), e a maior de 92,8% em SYARIF *et al.* (2023), e o Carbonato de Cálcio (CaCO_3) com 95% em Barbosa *et al.* (2018). Apesar disso, nota-se que as proporções de compostos nas amostras estudadas pelas referências bibliográficas apresentam uma variação considerável, mesmo para o composto de maior presença geral ($\text{CaO} / \text{CaCO}_3$). Outro ponto de destaque refere-se aos compostos de maior presença nos granitos e pedra São Tomé o SiO_2 (Dióxido de Silício) e Al_2O_3 (Óxido de Alumínio). Estes são os de menor teor nos mármore. Destaca-se que um dos estudos, ALYAMAC *et al.* (2018), apresentou um teor significativo de SiO_2 , de 28,4%, para a composição química do mármore estudado, situação anômala podendo configurar alguma formação específica do material utilizado pelos autores ou algum equívoco de procedimento. Os demais estudos que apresentam valores maiores de SiO_2 são os estudos de SONG *et al.*, (2022), com 7,9%, MUNIR *et al.*, (2017), 6,6%, KUMAR *et al.* (2012), 6%, VARADHARAJAM *et al.*, (2020), 5,9%, TOPÇU *et al.*, (2009), 4,7% e SIGH *et al.*, (2023), 4,6%.

Para os resíduos provenientes de granitos percebe-se que o composto químico mais evidente corresponde Dióxido de Silício (SiO_2), presente em todas as amostras dos estudos, apresentando menor percentual com 59,6% em ALLAM *et al.*, (2014). O segundo mais evidente, mas em uma proporção significativamente menor, é o Óxido de Alumínio (Al_2O_3) com percentual variando de 1,3% até 17,1%. Nota-se que o $\text{CaCO}_3 / \text{CaO}$, (os compostos principais dos mármore) são ínfimos na composição dos granitos e que existe uma variação relativamente considerável entre as proporções dos compostos principais apresentados pelos autores, o composto principal SiO_2 , varia de 59,6% a 92,4%. Nota-se que a pedra São Tomé se aproxima mais do resíduo de granito do ponto de vista de composição química em relação ao mármore. Nota-se que nas duas amostras avaliadas na Literatura científica da rocha

São Tomé existe a predominância do composto SiO_2 , também principal nos granitos, porém na pedra São Tomé em maior relevância.

Já em relação aos resíduos misturados, percebe-se que os compostos apresentam grandes variações de proporção, corroborando com ALMADA *et al.* (2020), que menciona que existe uma variação nas propriedades físicas e químicas dos resíduos devido aos diferentes tipos e quantidades de materiais comercializados nas unidades de beneficiamento. Sendo assim, nos resíduos misturados as proporções apresentam variação em função dos tipos de rochas ornamentais beneficiadas. Percebe-se que os maiores teores encontrados são de SiO_2 , contudo, concomitantemente, nota-se presença de CaCO_3 / CaO . Neste sentido, compreende-se que os resíduos misturados apresentam tanto mármore quanto granitos em sua composição. Em geral, a composição química dos resíduos de lamas de mármore e granito é principalmente carbonato de cálcio e silicatos, uma vez que são provenientes de fontes minerais de mármore e granito (GADO *et al.*, 2022). É possível sugerir, pela proporção de cada um deles, se o resíduo apresenta maiores proporções relacionadas a rochas silicáticas (granitos) ou carbonáticas (mármore).

Em relação a pozolanidade dos MGRS, a literatura científica apresenta divergências quanto a categorização neste aspecto. A maior parte das referências bibliográficas estudadas tal como ALMADA *et al.*, (2020), KARIMIPOUR *et al.*, (2021), ELYAMANY *et al.*, (2014), DANISH *et al.*, (2021), entre outros, classificam como inertes quimicamente, com atuação tipo filler, visto a sua não reatividade química e, sim, uma atuação física. Contudo, algumas poucas referências, tais como BRAGA *et al.*, (2010) e AZEVEDO *et al.*, (2019), classificam os resíduos estudados como não inertes quimicamente. Apesar da dubiedade encontrada na Literatura, a maioria dos estudos apresentam os MGRS como inertes quimicamente e os resultados gerais encontrados nas composições mineralógicas corroboram com esta classificação.

As composições mineralógicas dos MGRS registradas são apresentadas no Quadros de 1 a 4 com o resumo dos principais minerais presentes em função do tipo de resíduo pedra São Tomé, mármore, granito e outras rochas e/ou rochas misturadas. Destaca-se que as referências bibliográficas, em sua maior parte, apresentam apenas uma caracterização qualitativa nas Difrações de Raio-X. Apenas algumas poucas referências, sobretudo dos resíduos misturados, tratam a composição mineralógica de maneira quantitativa apresentando percentuais. A

composição mineralógica dos resíduos de granito é apresentada apenas por 23,8% das referências que se propõem a estudar este resíduo individualmente. Isto evidencia que a caracterização mineralógica dos resíduos provenientes de granitos ainda foi pouco explorada. De forma ainda mais relevante, existem ainda menos referências que realizam a caracterização mineralógica dos resíduos provenientes da pedra São Tomé, evidenciando a necessidade de aprofundamento e maior quantidade de estudos sobre esta rocha ainda pouco explorada.

Os principais componentes da lama de mármore ou pó de mármore residual são a calcita, a dolomita (KUMAR *et al.*, 2020) e o quartzo. Essa identificação mineralógica corrobora a composição química encontrada nos mármore e conduz ao entendimento da não reatividade dos resíduos de mármore, visto fases cristalinas identificadas. Da mesma forma, a composição mineralógica dos granitos e pedra São Tomé corrobora a composição química encontrada. A composição mineralógica dos granitos é marcada principalmente pela presença de quartzo, traços de albita e microclina. Estes minerais são comuns em rochas do tipo gnaiss (ABIROCHAS, 2025). E a pedra São Tomé é caracteristicamente Quartzo. Percebe-se que, diferentemente dos resíduos de mármore, não há traços de dolomita e nem de calcita nos resíduos de granito e pedra São Tomé. Os minerais encontrados nos difratogramas, como quartzo, microclina, moscovita e anortita são minerais típicos das rochas graníticas, enquanto a calcita e a dolomita fazem parte do mármore (BACARJI *et al.*, 2013). Já nos resíduos misturados, assim como na composição química, é possível identificar a existência da mistura de resíduos de mármore e granito.

Quadro 1 – Composição Mineralógica de resíduos de pedra São Tomé

Fonte	Composição Mineralógica
Carvalho, J.M.F.. <i>et al.</i> , 2019	Quartzo/Muscovita
Tolstoy, A. <i>et al.</i> , 2020	Quartzo

Fonte: Elaborado pela autora com base na bibliografia.

Quadro 2 – Composição Mineralógica de resíduos de mármore

Fonte	Composição Mineralógica
Ashish, D.K., 2018	Quartzo/Dolomita
Benjeddou, E. <i>et al.</i> , 2013	Quartzo/Calcita
Corinaldesi <i>et al.</i> , 2010	Quartzo/Anquerita
Evrarn, A. <i>et al.</i> , 2020	Clacita
Kabeer, K.I.S.A. <i>et al.</i> , 2018	Dolomita
Mashaly <i>et al.</i> , 2015	Calcita
Munir <i>et al.</i> , 2017	Quartzo/Calcita/Coridon
Sadek D.M. <i>et al.</i> , 2016	Calcita/Caulinita
Seghir, N.T. <i>et al.</i> , 2018	Dolomita/Calcita
Song, W. <i>et al.</i> , 2022 - Amostra M0	Quartzo/Calcita/Diopsode/Wollastonite
Souza, L.G.M. <i>et al.</i> , 2017	Quartzo/Hematita/Mica/Gehlenita
Varadharajan, S. <i>et al.</i> , 2020	Dolomia
Xi, Y. <i>et al.</i> , 2019	Calcita

Fonte: Elaborado pela autora com base na bibliografia.

Quadro 3 – Composição Mineralógica de resíduos de granito.

Fonte	Composição Mineralógica
Gupta, L.K. <i>et al.</i> , 2018	Quartzo/Ortoclase
Jain, A. <i>et al.</i> , 2022	Quartzo/Microclína/Albita
Medina <i>et al.</i> , 2017	Quartzo/Muscovita/Chamosita/Biotita/ Caulinita/Albita/Ortoclase
Sadek D.M. <i>et al.</i> , 2016	Quartzo/Microclina/Albita/Dickite
Vijayalakshmi, M. <i>et al.</i> , 2013	Quartzo/Microclina/Hematita/Mica/ Plagioclase

Fonte: Elaborado pela autora com base na bibliografia.

Quadro 4 – Composição Mineralógica de resíduos misturados.

Informações Gerais		Mineralogia																	
Fonte	Tipo de Resíduo	Quartzo	Muscovita	Dolomita	Microclina	Anorthite	Calcita	Biotita ou Gcrite	Culinita	Albita ou Albite	Citroclase	Dickite	Oligoclase	Cordiérite	Merfenoite	Feldspato	Hematita	Níca	Fajalite
Almada et al., 2023 - Amostra C1	Granito, Mármore, Quartzito, Cerâmicas, Porcelanatos, Ardósia e Pedra São Tomé	11,5		15,1			8,2	6,8		8,0	5,9		30,7	2,9	3,3				
Almada et al., 2023 - Amostra C2	Granito, Mármore, Quartzito, Cerâmicas, Porcelanatos, Ardósia e Pedra São Tomé	16,1		12,0			4,5	2,3		16,0	8,3		32,1	2,9	4,1				
Almada et al., 2023 - Amostra S1	Granito e Mármore	11,8		8,1			2,4	4,3		15,2	10,4		38,0	2,8	2,6				
Almada et al., 2023 - Amostra S2	Granito e Mármore	14,6		17,2			13,2	3,9		5,2	8,4		30,9	1,6	0,0				
Almada et al., 2023 - Amostra N1	Granito, Mármore, Porcelanato e Siestore	16,1		11,2			11,6	2,3		4,4	11,2		31,9	1,6	1,4				
Almada et al., 2023 - Amostra N2	Granito, Mármore, Porcelanato e Siestore	8,1		21,2			8,8	4,4		9,2	10,3		26,9	1,6	1,8				
Apolinário, E. C. A., 2014	Vármore e Granito	Sim		Sim														Sim	
Bacarli, E. et al., 2013 - Amostra A	Vármore e Granito	Sim	5 m	Sim	Sim	Sim													
Bacarli, E. et al., 2013 - Amostra B	Vármore e Granito	Sim	5 m	Sim	Sim	Sim	Sim												
Bacarli, E. et al., 2013 - Amostra C	Vármore e Granito	Sim	5 m	Sim	Sim	Sim	Sim												
Braga, J.C.S. et al., 2023	Mármore, Granito, Gnaise e Gábio	23,1					2,8	6,7	Sim, não quantificado		19,4		48,0						
Cruz, A.C.F., 2019	Vármore e Granito	Sim					Sim									Sim			
Gado, R.A., 2022	Vármore e Granito	Sim		Sim															
Martins, M.A.B. et al., 2022	Vármore e Granito	Sim		Sim			Sim			Sim						Sim	Sim		
Ferreira, M.I.A.L. et al., 2022	Vármore e Granito	Sim	5 m		Sim				Sim	Sim									
Sadek D.M. et al., 2016	Miscurado (Mármore e Granito)	Sim		Sim	Sim				Sim	Sim		Sim							
Souza, A.A.F. et al., 2022	Miscurado	Sim				Sim		Sim		Sim									
Souza, L.G.M. et al., 2017	Vármore e Granito	Sim					Sim												5 m
Teixeira, F. R. et al., 2021	Resíduos Ornamentais (não específica)	Sim			Sim			Sim		Sim									

Fonte: Elaborado pela autora com os dados das fontes inseridas no quadro.

O pó de mármore é muito característico com a presença de CaCO_3 , CaO e Ca_2SiO_3 . Estes compostos não aparecem em evidência em nenhuma das amostras de granito e pedra São Tomé. Os principais componentes químicos analisados para reatividade no estudo de KUORIBO (2022) são Al_2O_3 , CaO , Fe_2O_3 e MgO . E em todos os casos é bem provável que os resíduos sejam não reativos e atuem como filer. Quando a sílica (SiO_2) encontra-se no estado amorfo, ou vítreo, esta é considerada reativa, porém, quando se apresenta no estado cristalino possui baixa reatividade (APOLINÁRIO, 2014). A quantidade de SiO_2 presente no resíduo indica a possibilidade deste ser reativo, porém, aliado a avaliação com a Difração de Raios-X é possível obter informações sobre as fases cristalinas dos compostos existentes no resíduo (APOLINÁRIO, 2014). E, através desta, percebe-se que os quartzos então se apresentam em fases cristalinas mitigando a possibilidade de atuações químicas na inserção dos resíduos de granito e pedra São Tomé em compósitos cimentícios. Estes resultados de caracterização química e mineralógica mostram que os MGSR estão presentes na forma cristalina. Assim, nenhuma atividade pozolânica significativa deve ser esperada. Consequentemente, os MGSR atuarão principalmente como um agente nucleante dentro da microestrutura (BACARJI *et al.*, 2013).

A caracterização física, química e mineralógica dos resíduos de rochas ornamentais demonstra o potencial para aplicação em compósitos cimentícios, indicando que este é adequado para aplicações na construção civil (AZEVEDO *et al.*, 2019). Em função das caracterizações apresentadas na literatura científica, entende-se que os MGSR são provavelmente inertes quimicamente e sua lama de sedimentação apresenta finura compatível para atuar como adição mineral com uma atuação física na mistura. As diferenças físicas entre os resíduos pode estar associadas às diferenças mineralógicas e sua atuação física pode ser influenciada por estes fatores. Por exemplo, a pedra São Tomé apresenta partículas maiores e também a presença significativa de quartzo, que tem uma maior dureza de acordo com a escala de Mohs (dureza 7). O pó de mármore é muito rico em calcita, um mineral com menor dureza na escala de Mohs (dureza 3), e pobre em qualquer fração de minerais argilosos, não é reativo, consequentemente, pode ser considerado uma adição mineral tipo filer (BENJEDDOU *et al.*, 2013). Destaca-se que na Literatura Científica avaliada foram encontradas uma certa quantidade de estudos individualizados de mármore e granito, mas a avaliação individualizada em relação a pedra São Tomé

ainda está pouco explorada. Na Literatura Científica foram encontrados apenas três estudos que avaliam quartzitos (Pedra Mineira, quartzito russo e um quartzito que pode ser pedra mineira ou pedra são Tomé).

3.3 Aproveitamento em compósitos cimentícios

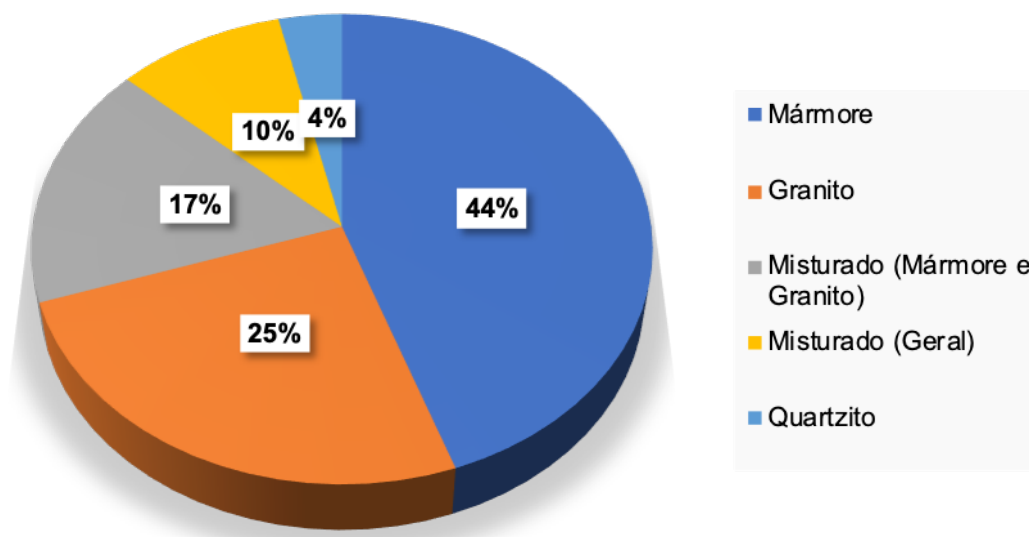
A utilização de resíduos de rochas ornamentais em compósitos cimentícios já é amplamente estudada pelos pesquisadores em diversos tipos de aplicação e analisadas sob diversos aspectos. Múltiplos estudos têm sido realizados com foco no reaproveitamento desses resíduos, como na produção de variados materiais de construção Paviers (MASHALY *et al.*, 2015), blocos de concreto (SOUZA *et al.*, 2017), argamassa tipo adobe (SEGALHÃES *et al.*, 2005), concretos comuns (GENCEL *et al.*, 2022; MILTRE *et al.*, 2016; PROKOPKI *et al.*, 2020), auto adensáveis (JAIN *et al.*, 2022; DOBISZEWSKA *et al.*, 2022; PALANISAMY *et al.*, 2022), de alto desempenho (TANGARAMVONG ET AL., 2021), concreto nanomodificado (KASHYAP *et al.*, 2022), concreto permeável (SINGH *et al.*, 2023), argamassas comuns e colantes (AZEVEDO *et al.*, 2019; GADO *et al.*, 2022) e até mesmo como remineralizador de solo (BRAGA *et al.*, 2023). O contínuo esgotamento dos recursos naturais na indústria da construção lança uma nova luz sobre o potencial uso de alguns resíduos industriais, como os resíduos de rochas ornamentais, nos seus diferentes materiais (SHIRAZI, 2011). Percebe-se uma amplitude de possíveis aplicações do resíduo de rochas ornamentais.

Com o objetivo de melhorar a sustentabilidade do setor da construção através de compósitos cimentícios *eco-friendly*, estão a ser realizados estudos utilizando os resíduos do beneficiamento de rochas ornamentais como substitutos parciais ou totais dos agregados naturais (CHEN *et al.*, 2020; DOBISZEWSKA *et al.*, 2022; GENCEL, *et al.*, 2022), substitutos ao cimento (MUNIR *et al.*, 2017; KUMAR *et al.*, 2020; KASHYAP *et al.*, 2022; PEREIRA *et al.*, 2022; OZKILIÇ *et al.*, 2023; ALMADA *et al.*, 2023) e como adição mineral à dosagem (MARTINS *et al.*, 2022; KARIMIPOUR *et al.*, 2021; DANISH *et al.*, 2021; BOADELLA *et al.*, 2019).

Em relação ao tipo de MGSR utilizado percebe-se que em sua maioria são provenientes da lama de sedimentação do processo de beneficiamento. Na Literatura científica pesquisada o resíduo mais estudado compreende o resíduo proveniente de lama do beneficiamento de mármore, em segundo lugar, de granitos, posteriormente

os misturados e, por fim, os quartzitos. Na Figura 11 é apresentado um resumo dos percentuais de estudos registrados na Literatura Científica separados por tipo de MGSR estudado, considerando um total de 85 estudos analisados, conforme Tabelas resumo inseridas nos apêndices deste trabalho (Apêndices de 1 a 4).

Figura 11 – Tipos de resíduos utilizados na Literatura Científica de um total de 85 artigos estudados.

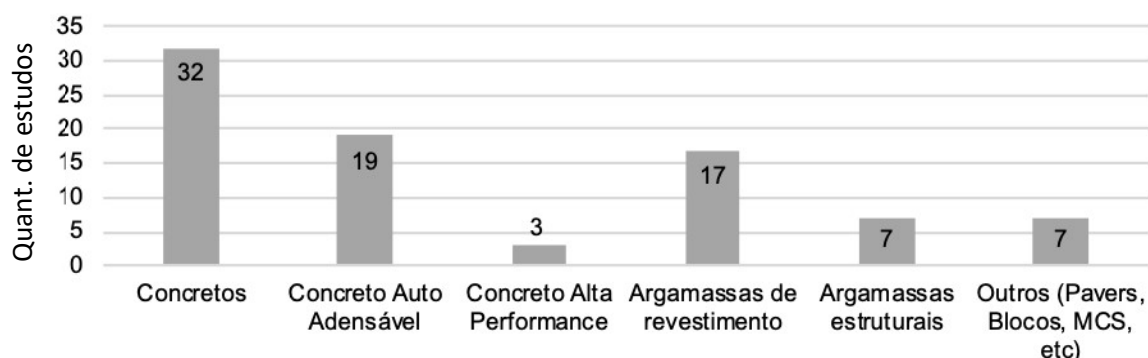


Fonte: Elaborado pela autora.

Percebe-se que dos 85 materiais estudados na Literatura Científica, 44% dos estudos são os mármore, 25% os Granitos, 17% os resíduos que misturam apenas mármore e granito, 10% os resíduos que misturam diversos materiais beneficiados nas marmorarias e apenas 4% o quartzito. Neste sentido, percebe-se que o estudo da Pedra São Tomé separadamente ainda está pouco explorado.

Em relação aos tipos de compósitos cimentícios estudados com a utilização dos resíduos de rochas ornamentais, têm-se uma síntese na . Percebe-se que a utilização de MGSR em concretos de alta performance e argamassas estruturais ainda são os temas menos explorados. O Concreto de Alta Performance corresponde a 3,5% dos estudos analisados e as argamassas estruturais com a utilização de resíduo de rochas ornamentais encontrou-se apenas 8% dos estudos levantados. Neste sentido, percebe-se que a aplicação de resíduos de rochas ornamentais em argamassas estruturais ainda está pouco explorada. Ressalta-se que não foi encontrado nenhum estudo que avalie comparativamente os resíduos provenientes de Mármore, Granito e Pedra São Tomé para argamassas de alto desempenho.

Figura 12 – Quantidade de estudos com aplicação de resíduo de rochas ornamentais para cada tipo de compósito cimentício em 85 estudos coletados



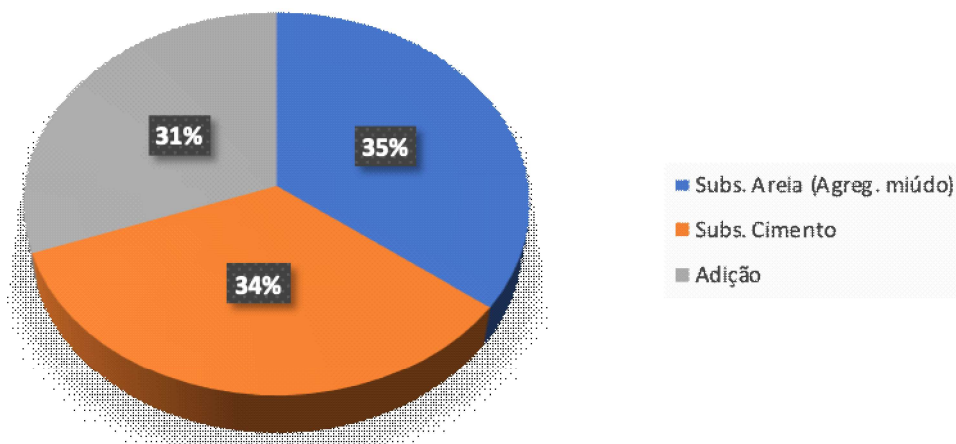
Fonte: Elaborado pela autora.

Em relação à forma de aplicação dos MGSR, os estudos científicos levantados empregam os resíduos de rochas ornamentais em distintas formas de aplicação (conforme já apresentado anteriormente neste trabalho). Estas aplicações foram separadas pelos seguintes aspectos: em substituição ao cimento, substituição da areia (agregado fino) e como adição mineral à dosagem. Os estudos como Dobiszewska *et al.* (2022), Elyamany *et al.* (2014), Karimipour *et al.* (2021) e Meera *et al.* (2019) avaliaram as influências do granito e mármore separadamente nas amostras e observaram resultados distintos entre os dois tipos de resíduo nas propriedades mecânicas e de durabilidade das amostras avaliadas. Sendo de relevância o entendimento do tipo de resíduo e seus impactos nos compósitos cimentícios, assim como sua forma de aplicação.

Na Figura 13 é apresentada uma síntese das formas de aplicação do resíduo de rochas ornamentais em compósitos cimentícios nos estudos levantados. Percebe-se que o uso como adição mineral a dosagem é a menor das aplicações utilizadas e, destes, a grande parte ocorre em concretos autoadensáveis. A Figura 14 sintetiza os compósitos cimentícios estudados na Literatura Científica coletada considerando a aplicação como adição mineral a dosagem. Dos 85 estudos avaliados na Literatura Científica coletada, apenas 26 deles consideram o uso dos resíduos como Adição Mineral a dosagem, sendo estes aplicados nos compósitos cimentícios.

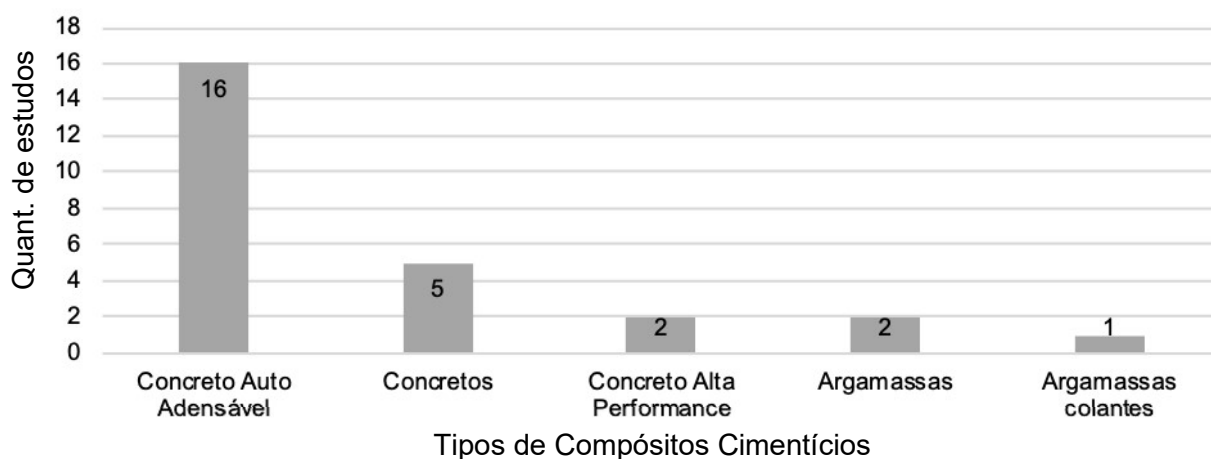
Percebe-se que a maior parte dos estudos focam em concretos autoadensáveis (CAA) e não foram encontrados nenhum estudo que considera a aplicação dos resíduos de rochas ornamentais como adição mineral a dosagem em argamassas de alto desempenho ou estruturais.

Figura 13 – Formas de aplicação dos resíduos de rocha ornamental na literatura científica de um total de 85 estudos da Literatura Científica



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 14 – Compósitos estudados na Literatura Científica com o resíduo de rocha ornamental como adição mineral, total de 26 estudos da Literatura Científica que utilizam como adição mineral



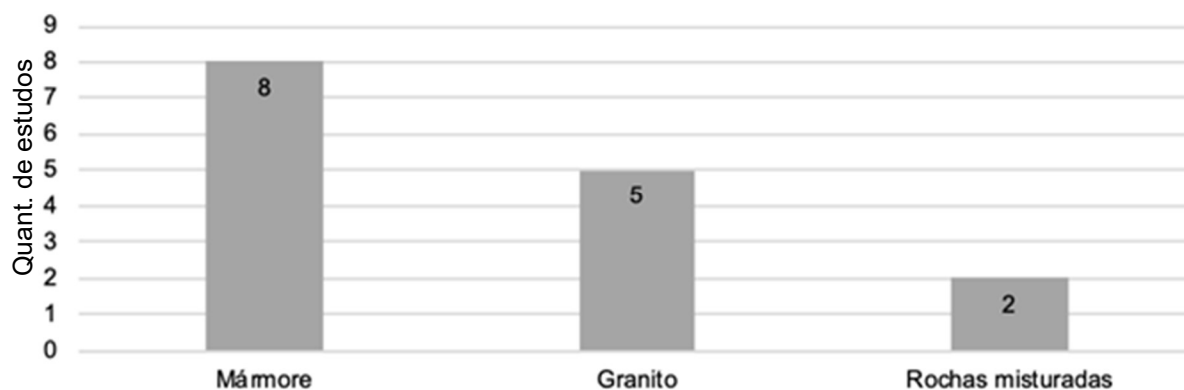
Fonte: Elaborado pela autora.

Em relação aos concretos autoadensáveis, dos 16 estudos, um deles corresponde a uma revisão da aplicação junto ao metacaulim (DANISH *et al.*, 2021) e os 15 restantes consideram a utilização de mármore, granito e rochas misturadas sendo conforme apresentado na Figura 15.

Dos estudos para concreto autoadensáveis (CAA), alguns deles consideram junto aplicação dos resíduos de rochas ornamentais a utilização de outras adições minerais, tais como cinzas volantes e microsilica (MEERA *et al.*, 2018; MEERA *et al.*, 2019). O uso de pós residuais como adições minerais em CAA melhora suas propriedades físicas, mecânicas e propriedades relacionadas à durabilidade em

comparação com a mistura de controle do mesmo teor de cimento (SADEK *et al.*, 2016).

Figura 15 – Quantidade de estudos da Literatura Científica para cada tipo de resíduo de rocha ornamental utilizada como adição mineral a dosagem em Concretos Autoadensáveis



Fonte: Elaborado pela autora.

Em relação aos resultados obtidos na Literatura Científica relacionados ao Concreto Autoadensável com o uso do MGSR como adição mineral, em relação a dosagem, notam-se resultados distintos em função da rocha origem do MGSR utilizado. MEERA *et al.* (2018), TOPÇU *et al.*, (2009), VALDEZ *et al.*, (2011) e ALYAMAC *et al.*, (2017) apresentam seus estudos relacionados apenas ao uso de resíduos de mármore. KARMEGAM, A. *et al.*, (2014) e MEERA, *et al.*, (2019) apresentam em seu estudo o uso de resíduos de granito. MARTINS *et al.*, (2022), e PEREIRA *et al.*, (2022), apresentam os estudos com resíduos misturados e, SADEK *et al.*, (2016), ELYAMANY, *et al.*, (2014), e KARIMIPOUR, *et al.*, (2021), apresentam estudos avaliando as diferenças nos resultados em função da origem do resíduo sendo mármore ou granito e em SADEK *et al.*, (2016), também é avaliado o resíduo misturado.

No estudo de PEREIRA *et al.* (2022), são avaliadas amostras com a adição de resíduo de mármore e granito misturados nas proporções de 13,77%, 4,78% e 3,64%. Os resultados de resistência a compressão demonstram que a amostra com maior teor de resíduo obteve menor resistência que a amostra referência, já as duas outras amostras apresentaram ganhos de resistência a compressão em relação a amostra referência nas três idades testadas (7, 28 e 63 dias). Um ponto interessante que a amostra de teor intermediário de resíduo, 4,78, que apresentou melhor desempenho mecânico, indicando uma não linearidade de aumento de resistência em relação a proporção de resíduo adicionada.

Em contraposição, SADEK *et al.* (2016), observaram que a resistência à compressão apresentou um aumento sistemático com o aumento do teor de resíduos adicionado ao concreto, mas o tipo de resíduo apresentou diferenças nos resultados. SADEK *et al.* (2016) analisaram a influência do tipo de resíduo nos resultados das amostras e a resistência à compressão apresentou alterações pelo tipo de resíduo utilizado (mármore, granito ou misturado), mas também pela proporção aplicada. A utilização do resíduo de mármore tem um efeito marginal na resistência à compressão, enquanto o uso de resíduos misturados aumenta significativamente esta resistência (SADEK *et al.*, 2016). O aumento na resistência à compressão aos 28 dias foi de 1,7%, 3,9% e 9,5% com o uso de 30%, 40% e 50% de mármore, respectivamente, enquanto o aumento foi de 7,8%, 23,1% e 39,3% com o uso de 30%, 40% e 50% de granito, respectivamente, em comparação com a mistura controle com teor de cimento de 400 kg/m³. A utilização de 30%, 40% e 50% de resíduo misturado aumentou a resistência à compressão aos 28 dias em 35,9%, 43,7% e 51,5%, respectivamente. Assim, a proporção ótima de adição de resíduo foi de 50% em peso de 400 kg/m³ de teor de cimento, independentemente do tipo de resíduo utilizado (SADEK *et al.*, 2016).

KARIMIPOUR *et al.* (2021) apresentam que para os CAA com utilização de resíduos houve variações nos resultados de resistência a compressão entre as amostras que incluíam mármore ou granito, sendo do granito superiores. Assim como SADEK *et al.* (2016), o aumento do teor de granito ou mármore adicionado aumentou a resistência a compressão em relação a amostra controle a medida de sua inserção.

ALYAMAC *et al.* (2017), apresenta resultado que corroboram os de PEREIRA *et al.* (2022), no sentido em que não existe uma linearidade de aumento da resistência a compressão com a proporção de aumento do teor de adição de resíduo de mármore. A resistência à compressão variou de 34 a 65 MPa aos 28 dias. O fator a/c e a adição de resíduo de mármore são eficazes nas propriedades do CAA. Porém, quando o aumento de resistência está em questão, a água é mais eficiente que o resíduo de mármore. O aumento do teor de resíduo de mármore perde seu desempenho à medida que a relação a/c aumenta (ALYAMAC *et al.*, 2017). Em Meera *et al.* (2019), as resistências à compressão para todos os quatro grupos de CAA depende principalmente da relação a/c, desde que a correção da água tenha sido feita corretamente e o concreto seja bem proporcionado, bom e coeso. Em Meera *et al.*

(2019) também não há uma linearidade no aumento da resistência a compressão quanto ao aumento proporcional do teor de resíduo adicionado.

Os resultados gerais obtidos em relação as resistências a compressão para as adições de MGSR em CAA na Literatura Científica indicam dois tipos de resultado: um que aumenta a resistência a medida em que o resíduo é adicionado e um segundo contemplando um teor ideal de adição para que se possa atingir melhores resistências, sendo que, a partir de determinada quantidade de adição, surgem perdas das resistências mecânicas. Esta correlação ocorre, possivelmente, em função do empacotamento e preenchimento de vazios pela adição mineral. Além disso, observa-se que nos registros de resultados encontrados na literatura científica, o tipo de resíduo interfere nos valores de resistência a compressão, tendo estas variações pelo tipo de resíduo adicionado.

Em relação ao concreto de alta resistência que utiliza adições minerais com resíduos de rochas ornamentais foram encontrados dois estudos o de Evram. *et al.* (2020), que apresenta os efeitos de resíduos de plástico eletrônico e pó de mármore nas propriedades de endurecimento do concreto de alta resistência e o de Boadella *et al.* (2019), que apresenta a influência dos resíduos de granito nas propriedades do concreto de altíssimo desempenho. Boadella *et al.* (2019), também concluíram que existe um teor ideal de utilização do resíduo, neste caso, 35% de substituição do quartzo micronizado, mas sendo todos os teores analisados com melhor resistência a compressão que a amostra controle (amostra controle com resistência a compressão aproximadamente 115MPa e todas as amostras testadas, 35%, 70% e 100% de substituição com resistências acima de 122MPa). No estudo de Evram *et al.* (2020), a adição de 15% de resíduo de mármore aumentou a resistência à compressão entre 7% e 15% quando comparada com as misturas de concreto sem esta adição a dosagem. Este resíduo não é um material pozolânico, mas quando usado em concretos e argamassas atua como um filer quimicamente inerte, aumenta a resistência à compressão (EVRAM *et al.*, 2020). De acordo com Munir *et al.* (2017), a calcita do resíduo de mármore interage com o C₃A durante a hidratação do cimento para formar carbo-aluminato, o que melhora a capacidade de ligação do cimento resultando em maior resistência.

Em relação às argamassas com adição de resíduos de rochas ornamentais citam-se os estudos de Apolinário (2014), Li *et al.* (2019) e Almada *et al.* (2022). Nos

resultados de resistência a compressão de Li *et al.* (2019), esta diminui à medida que a relação a/c aumentou. A adição de resíduo de mármore sem alterar a relação a/c produziu aumento da resistência, sendo correspondente ao volume de resíduo de mármore até 20%. Por outro lado, ao adicionar o resíduo como substituto ao cimento repercutiu em alterações negativas de resistência a compressão. No estudo de Apolinário (2014), houve aumento da resistência a compressão com o acréscimo do resíduo de rochas ornamentais misturado, em quase todas as idades, principalmente nas idades mais avançadas. Este fato se atribui ao efeito físico da adição mineral sobre o empacotamento das partículas. O alto teor de finos contribui para a nucleação heterogênea, ou seja, um processo conduzido pela ativação química da hidratação do cimento que catalisa o processo de nucleação dos hidratos (APOLINÁRIO, 2014). O estudo de Almada *et al.* (2022), as argamassas com aditivo obtiveram as maiores resistências devido à redução do fator a/c. O ganho de resistência à compressão, em relação à argamassa referência foi de 11,19% e 10,18%. Em relação ao estado fresco, nota-se que a coesão do concreto é inversamente proporcional à porosidade, assim, a diminuição da porosidade do compósito pode levar a aumentos na resistência à compressão e na compacidade (TOPÇU *et al.*, 2009). A utilização de filers não pozolânicos (granito e mármore) diminui a segregação e o sangramento, e os filers não pozolânicos de granito e mármore apresentam menor absorção de água e índice de vazios em comparação com cargas pozolânicas (ELYAMANY *et al.*, 2014).

Em relação aos parâmetros de durabilidade é notado que os estudos na Literatura Científica corroboram as melhorias na capilaridade e absorção de água dos compósitos cimentícios com a utilização de resíduos de rochas ornamentais como adição. Topçu *et al.* (2009) concluíram que o coeficiente de capilaridade do concreto diminuiu em relação a amostra controle com o aumento do teor de adição de resíduo de mármore entre 50 e 200 kg/m³ e que estes são diretamente relacionados a porosidade. Topçu *et al.* (2009) concluíram também que de 200 a 300 kg/m³, onde o coeficiente de capilaridade aumentou, o tamanho médio dos poros foi maior e menor a resistência à compressão. Em Sadek *et al.* (2016) os resultados mostraram que o tipo e as características do resíduo têm um efeito significativo na absorção de água do concreto. As misturas de CAA com resíduos de rochas misturadas apresentaram a menor absorção de água, enquanto as que utilizaram resíduos de mármore tiveram a maior absorção de água. Isto indica o efeito distinguível de resíduos de granito e

rochas misturadas na estrutura de poros do concreto em comparação com os de mármore. Esta diferença no comportamento das adições de resíduos é provavelmente atribuída à variação na sua finura e possível atividade pozolânica (SADEK *et al.*, 2016). Vale ressaltar que esta pozolanicidade apresentada por Sadek *et al.* (2016) está na dubiedade de classificação mencionada anteriormente nesta pesquisa. É notado também que os resultados corroboram com os de TOPÇU *et al.* (2009) sendo que a medida da adição do resíduo melhor os resultados, contudo, até certo ponto limite de adição em que passa a se perder as melhorias. Pereira *et al.* (2022) observaram que os concretos que apresentaram maiores valores de resistência à compressão tenderam a apresentar menores valores médios de absorção de água por imersão e índice de vazios. Esse comportamento se deve aos pontos de nucleação que melhoraram o empacotamento das partículas na matriz cimentícia gerando um refinamento dos poros e uma aceleração na hidratação do cimento. De acordo com Pereira *et al.* (2022) a adição de resíduos de rochas ornamentais reduziu a absorção de água em relação a amostra controle. Além disso, o efeito filler gera a desconexão dos poros e o decréscimo da capilaridade. O coeficiente de sorptividade está relacionado à absorção por capilaridade, à porosidade e à interligação dos poros, podendo assim ser visto como um parâmetro de durabilidade do concreto. Logo, quanto menor este coeficiente, melhor tende a ser o concreto e todas as amostras testadas por Pereira *et al.* (2022) apresentaram índices menores que a amostra controle.

Em relação às argamassas, no estudo de Almada *et al.* (2022) os resíduos melhoraram a estrutura de poros da argamassa, tornando-a mais homogênea. Houve melhora na resistividade elétrica da argamassa em comparação à argamassa de referência, devido à redução do fator a/c , menor conectividade dos poros e menor quantidade de íons OH na solução dos poros. De modo geral, pode-se observar que o resíduo é mais eficiente em menores relações a/c e sua utilização como filler promove melhor empacotamento das partículas. Os menores valores de absorção por imersão e porosidade foram obtidos pelas argamassas contendo aditivo plastificante, devido à menor relação a/c , enquanto o menor coeficiente de capilaridade foi obtido pela argamassa referência.

Em relação ao ataque de sulfatos, em Sadek *et al.* (2016), que o uso das adições minerais de granito e rochas misturadas, foi considerado muito eficaz para

aumentar a resistência ao ataque de sulfato no concreto. Apesar dos resultados com o uso de resíduo de mármore serem satisfatórios, as misturas com granito e rochas misturadas apresentaram mais resistência ao ataque de sulfatos. Martins *et al.* (2022) concluiu que a adição de resíduos de rochas ornamentais misturadas contribui para tornar a matriz cimentícia mais densa e evita a penetração de agentes nocivos no concreto. O empacotamento de partículas tem efeito na diminuição da capilaridade e na diminuição da permeabilidade a agentes deletérios do concreto. Pereira *et al.* (2022) observou que em função do refinamento de poros da matriz a migração de cloretos é reduzida, a resistividade elétrica aumentada e o coeficiente de carbonatação reduzido com a utilização do resíduo de rochas ornamentais como filer em CAA. A adição dos resíduos de rochas ornamentais promove maior densidade de empacotamento, melhoram a resistência (resistência à compressão, tração e flexão), durabilidade e resistência à penetração de íons cloreto (DANISH *et al.*, 2021).

Em relação a microestrutura, através de imagens de MEV, Topçu *et al.* (2009) observaram que o resíduo de mármore, ainda existe nas pastas após 28 dias de hidratação (mesmo as partículas com finura elevada). Ou seja, o resíduo não reagiu e atou apenas como uma ação física de preenchimento, adição do tipo filer. Na microestrutura do CAA, como resíduo de mármore atua como filer, ocorre uma boa ligação entre o agregado e a matriz de cimento hidratado, caracterizando uma zona de transição bem aderida, elemento característico para alta resistência de concretos. Sadek *et al.* (2016) atribuíram a diferença nos resultados de resistência à compressão à diferença nas características e comportamento de cada tipo de resíduo utilizado como adição. Em função da ASE, suas partículas finas atuam como micro-filers preenchendo os poros capilares e a zona de transição, melhorando o empacotamento com maior coesão e microestrutura mais densa. SADEK *et al.* (2016) atribuíram uma pequena atividade pozolânica aos resíduos de granito e de rochas misturadas, estes reagem com hidróxido de cálcio (CH) para formar gel secundário de hidrato de silicato de cálcio (CSH). Assim, os resíduos de granito e rochas misturadas apresentaram o melhor desempenho devido à sua atividade pozolânica e efeito filer, enquanto o resíduo de mármore apresenta apenas o efeito filer.

De acordo com Elyamany *et al.* (2014), os padrões de difração de raios-X mostraram que não há mudança óbvia nas amostras testadas pelo tipo de filer utilizado, apresentaram efeito insignificante. O único efeito claro é que o uso de

adições pozolânicas geram baixos teores de hidróxido de cálcio e etringita em comparação com os filers não pozolânicos de resíduos de granito e mármore. Karimipour *et al.* (2021) apresentaram que na microestrutura das amostras com resíduo de mármore foi observada uma cristalização que levou ao aumento do desempenho mecânico sendo as formações de hidrato de silicato de cálcio – CSH a principal razão. Além disso, houve um melhoramento do desempenho do compósito em função preenchimento dos poros pela finura das partículas de mármore. Pereira *et al.* (2022) notaram diferenças nas pastas cimentícias com incorporação de resíduos de mármore e granito, através dos picos da difração de Raio-X. Os picos de Portlandita foram mais intensos, principalmente nas idades iniciais. Esse comportamento está associado às reações das fases silicáticas (alita e belita), cujos picos são menos intensos, devido à incorporação de resíduo de mármore e granito na mistura, o que gerou o efeito de pontos de nucleação e assim acelerou as reações de hidratação do silicato. Além disso, observa-se maior presença de quartzo e picos mais intensos, com leves alterações durante o processo de hidratação.

3.4 Considerações finais sobre a revisão bibliográfica

A despeito de toda a bibliografia analisada, os resíduos obtidos do beneficiamento de rochas ornamentais podem ser considerados um produto ecologicamente adequado, pois oferece uma solução viável para a grande quantidade de resíduos de lama de mármore no mundo (BENJEDDOU *et al.*, 2013). Os estudos que realizam o aproveitamento de MGSR em matrizes cimentícias utilizam em sua maior parte o resíduo proveniente da lama do processo de beneficiamento do mármore, mas também foram encontrados estudos que utilizam granito, rochas misturadas e apenas três com quartzito. Em função da caracterização granulométrica apresentada para os resíduos provenientes da lama de sedimentação do processo de beneficiamento das rochas ornamentais, percebe-se que este tipo de resíduo não precisa de cominuição para aplicação, podendo ser utilizado *in natura*, apenas com um procedimento de secagem e destorroamento manual, processo benéfico à sua aplicação. O processo de cominuição requer energia, o que reduz a ecoeficiência do produto final (CARVALHO *et al.*, 2019).

Os estudos científicos concluem que os resíduos provenientes do mármore são resíduos inertes quimicamente e podem atuar fisicamente como adição mineral a

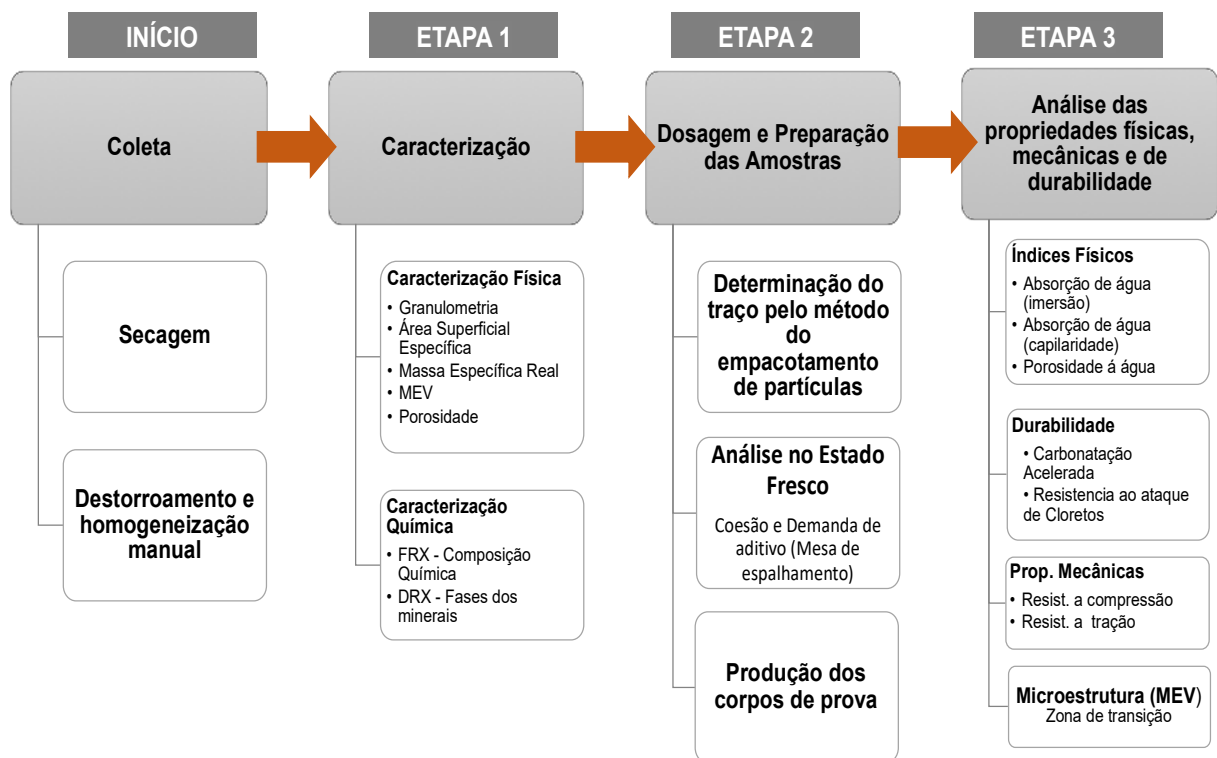
dosagem através do efeito filler e alguns estudos apresentam que os resíduos provenientes de granito possuem uma pequena atividade pozolânica (SADEK *et al.*, 2016). De maneira geral, quando substitutos do cimento, as amostras nos estudos apresentaram reduções nas propriedades mecânicas de resistência à compressão. Contudo, quando utilizadas como adição à dosagem foram notados ganhos de resistência, até uma dosagem ideal que varia em cada estudo. A partir disso, notam-se perdas. Além disso, apresentam ganhos nos indicadores de durabilidade, tais como porosidade, absorção de água, capilaridade ou índice de penetração de sulfatos. De modo geral, pode-se observar que a aplicação do resíduo é mais eficiente em menores relações água/cimento e sua utilização como adição promove melhor empacotamento das partículas, contribuindo positivamente para a maioria das propriedades, além de auxiliar na busca por materiais sustentáveis. (ALMADA *et al.*, 2022). Observa-se na literatura científica que o tipo de resíduo (mármore, granito, rochas misturadas ou quartzitos) apresentam resultados distintos nas propriedades mecânicas, indicadores de durabilidade e microestrutura. A origem, o tipo e as características do pó residual têm um efeito significativo no comportamento do compósito (SADEK *et al.*, 2016).

O uso de resíduos de rochas ornamentais como adições minerais melhora as propriedades físicas, mecânicas e propriedades relacionadas à durabilidade de compósitos cimentícios em comparação com a mistura de controle do mesmo teor de cimento (SADEK *et al.*, 2016). Apesar da razoável quantidade de estudos sobre as aplicações dos resíduos de rochas ornamentais em compósitos cimentícios, o uso de resíduos como adição mineral em argamassas estruturais ainda está pouco explorado e não foi encontrado nenhum estudo que avalie comparativamente as implicações destes três tipos de resíduo de rocha ornamental (mármore, granito e Pedra São Tomé) nas propriedades mecânicas e de durabilidade de argamassas estruturais como adição mineral. Além disso, foi encontrado apenas três estudos que considerasse a avaliação individualizada para a pedra São Tomé para quaisquer compósitos cimentícios. Visto isso, se faz importante uma avaliação da influência de cada tipo de MGSR quando aplicado como adição mineral no compósito cimentício argamassa estrutural e considerando a pedra São Tomé nesta avaliação, visto que Minas Gerais é um grande produtor e exportador da mesma.

4 MATERIAIS E PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental proposto compreende três etapas: (i) preparação e caracterização dos resíduos, (ii) dosagem e preparação das argamassas com adição do resíduo e (iii) análise das propriedades mecânicas, indicadores de durabilidade e microestrutura das argamassas, ver na Figura 16. Figura 16

Figura 16 - Fluxograma do programa experimental



Fonte: Elaborado pela autora.

Foram utilizados os Laboratórios de “Caracterização de Materiais de Construção Civil e Mecânica”, de “Concreto e Argamassa” e “Laboratório de Metais” da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais e o Laboratório de caracterização e Processamento de Nanomateriais da Escola de Física da Universidade Federal de Minas Gerais. Além disso, alguns ensaios de caracterização dos materiais foram realizados pelo Laboratório de Materiais Inovadores Sustentáveis (LAB-MIS) do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG).

4.1 Materiais

Para a elaboração das argamassas foi utilizado o Cimento Portland CP-V ARI, por ser um cimento com baixo teor de adições minerais e encontrado no mercado, sendo utilizado o da marca Nacional. A areia utilizada foi a areia normal (ABNT NBR 7214, 2015), fornecida pelo IPT, composta por quatro frações granulométricas (nº16, 30, 50 e 100) igualmente fracionadas. Para o estudo foi utilizada água potável proveniente da rede de abastecimento público, fornecida pela COPASA. O aditivo químico do tipo superplastificante utilizado para redução do consumo de água e manutenção da trabalhabilidade corresponde ao MC-Power Flow 4001 da MC-Bauchemie.

Os resíduos de rochas ornamentais foram coletados em forma de lama proveniente do processo de beneficiamento dos respectivos materiais, coletados dos “coxos”/bacias de sedimentação ou lagoas de sedimentação das marmorarias/jazidas. Os resíduos foram coletados separadamente e compreendem rochas ornamentais dos tipos mármore, granito (especificamente granito denominado no mercado como Branco Siena) e pedra São Tomé. Cada um dos resíduos é proveniente de empresas distintas sendo o mármore e o granito provenientes do estado do Espírito Santo e a pedra São Tomé de uma marmoraria localizada em Alpinópolis-MG. Os resíduos foram armazenados em recipientes plásticos hermeticamente fechados. Posteriormente, foram secos em estufa por 24h à $100\pm 5^{\circ}\text{C}$, destorroadas manualmente, homogeneizados e passados na peneira de 150 μm para utilização do conteúdo passante. Novamente, foram identificados e armazenados na UFMG em recipientes plásticos hermeticamente fechados até a sua utilização.

4.2 Etapa 1: Caracterização dos resíduos e matérias primas

Os materiais foram caracterizados quanto aos aspectos físicos, químicos e morfológicos das partículas. Primeiramente, foi realizada a granulometria a laser das partículas do cimento e da fração passante dos resíduos. Foi utilizada a técnica de difração de laser no equipamento CILAS 1090 Líquido, com faixa de 0,04 μm – 500,00 μm / 100 Classes.

A identificação dos elementos químicos dos resíduos e do cimento foi determinada pela análise de fluorescência de raios-X (FRX), com fusão de tetraborato de lítio e perda ao fogo (LOI) por calcinação da amostra à 1000°C . Para a identificação das

fases minerais foi usado o método da difração de raios-X (DRX) para amostras em pó da marca Philips (Panalytical, sistema 1710, com o detector tipo fotomultiplicador. Tubo de anodo de cobre (Z=29): λ K α médio = 1,54184Å -- λ K α 1 = 1,54056Å).

Na determinação da massa específica real dos materiais utilizou-se o método de picnometria em gás Hélio através do Picnômetro Multipycnometer MVP-6DC Quantachrome Instruments. Para a mensuração da área superficial específica (ASS) adotou-se o método de adsorção no modelo de Brunauer, Emmett e Teller (BET) e para a determinação da porosidade o modelo Non Local Density Functional Theory (NLDFT). O equipamento a ser utilizado foi o Anton Paar Nova 60.

A forma e textura das partículas dos resíduos e do cimento foram avaliadas por meio de imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) em um equipamento Hitachi TM3000, com detector de elétrons retroespalhados com aceleração de 15 kV, ensaio realizado no Laboratório de Materiais Inovadores Sustentáveis (LAB-MIS) do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG).

4.3 Etapa 2: Dosagem

A dosagem das argamassas foi definida segundo o método de empacotamento máximo das partículas com a utilização do *software Elkem Materials Mixture Analyzer* (EMMA). Este método foi adotado por gerar dosagens que consideram o melhor preenchimento possível das amostras, propiciando compósitos mais densos com otimização de espaços e materiais. No programa foram inseridos os dados de granulometria dos sólidos, volume, densidade e quantidade de sólidos na dosagem. A partir da curva granulométrica de cada um dos materiais, são geradas as curvas de empacotamento experimental máximo da mistura seca. Foram estabelecidos os parâmetros de $D_{\text{máx}} = 2,4$ mm (dimensão máxima das partículas correspondente à areia) e $D_{\text{mín}} = 0,1$ μm (dimensão mínima das partículas correspondente ao cimento), considerando limite de detecção do granulômetro. Foi estabelecido o modelo de Andreasen e Andersen Modificado com o módulo de distribuição $q = 0,30$.

Posteriormente, utilizou-se o Método dos Mínimos Quadrados (MMQ), conforme Equação 01, para gerar uma curva de empacotamento máximo da mistura seca e definir a dosagem de empacotamento máximo. A proximidade entre as curvas estabelece o melhor empacotamento a partir dos parâmetros estabelecidos.

$$\text{RSS} = \sum_{i=1}^n [P(D_i) - P_{\text{mod}}(D_i)]^2 \quad (1)$$

Em que: RSS = soma residual dos quadrados

$P(D_i)$ = fração de sólidos menores que o diâmetro D_i da mistura

$P_{\text{mod}}(D_i)$ = fração de sólidos menores que o diâmetro D_i , do modelo de Andreassen, obtida pela eq.

A partir da relação 1:3 (cimento: areia normal), variou-se a quantidade de resíduo em cada uma das argamassas produzidas até que, através do método de empacotamento adotado, registrou-se o menor RSS para as argamassas estudadas. Identificou-se o teor de adição ideal para cada um dos resíduos utilizados. Visto a proximidade de resultados e a intenção de análise comparativa entre os tipos de rochas, adotou-se o mesmo teor para todas as argamassas.

4.4 Etapa 2: Ajustes dos traços e moldagem das amostras

Após a definição do teor de resíduos, adotou-se uma relação água/cimento de 0,40 e executou-se amostras das argamassas propostas avaliando-se o índice de consistência pelo método da mesa de espalhamento (*Flow table*), segundo a NBR 13276 (ABNT, 2016), para definição do teor de aditivo superplastificante. Adotou-se o índice de consistência em 200 ± 15 mm.

A moldagem seguiu as diretrizes de tempo de mistura da norma NBR 7215 (ABNT, 2019) e o equipamento utilizado foi um misturador acoplado a uma furadeira. Foi adotado este equipamento para viabilizar a mistura total do volume dos corpos de prova em uma única mistura, de forma a evitar variações de moldagem. Os corpos de prova cilíndricos ($\varnothing 5 \times 10$ cm) foram executados com adensamento por vibração, em mesa vibratória, em três camadas, corpo cúbicos com 4 cm de aresta em duas camadas e os prismáticos (4x4x16 cm) em duas camadas.

A cura foi realizada em câmara úmida, com umidade acima de 90%, por 24hrs, após este período foram imersos em água em recipiente plástico fechado até os momentos dos testes – 7, 28 e 98 dias. Para os ensaios mecânicos, os corpos de prova foram removidos dos recipientes 24 horas antes dos ensaios e deixados para secagem ao tempo.

4.5 Etapa 3: Propriedades no Estado Endurecido

No estado endurecido foram analisadas as propriedades físicas, mecânicas, de durabilidade e microestruturais das amostras. Neste sentido, pode-se identificar a

influência dos respectivos resíduos nas propriedades dos compósitos cimentícios de alto desempenho. Os ensaios realizados compreendem:

- **Capilaridade:** foram utilizados 4 corpos de prova cilíndricos, conforme NBR 9779 (ABNT, 2012), para cada resíduo com dimensões de $\theta 5 \times 10$ cm². Os corpos de prova foram colocados em uma estufa a 105°C por 72 horas. Posteriormente foram posicionados sobre um suporte cerâmico dentro de um recipiente preenchido com água até o nível de 5 mm acima de sua face inferior. A massa saturada (m_{sat}) foi determinada a 10 e 90 minutos, 3, 6, 24, 48 e 72 horas após o contato dos corpos de prova com a água e, posteriormente, calculada a capilaridade conforme Equação 2.

$$C = \frac{m_{sat} - m_s}{S} \quad (2)$$

Em que: C = capilaridade em g/cm²;

m_{sat} = massa saturada mensurada, em g;

m_s = massa do corpo de prova seco, em g;

S = área da seção transversal em cm²

- **Absorção de água por imersão, massa específica e porosidade:** foram utilizados os mesmos corpos de prova (CP's) usados para a análise de capilaridade, sendo considerados os parâmetros da NBR 9778 (ABNT, 2009). Após o ensaio de capilaridade, o recipiente foi totalmente preenchido com água à temperatura de 21 a 25°C, cobrindo integralmente os CP's. Estes foram deixados imersos por um tempo de 72 horas. Após este período, com a saturação das amostras, foi realizada uma pesagem e iniciou-se o processo de aquecimento da água até fervura após 15 a 30 minutos. Após início da fervura foi mantido em ebulição pelo período de 5 horas e, posteriormente, resfriou-se a água naturalmente até 21 a 25°C. Em seguida, foi feita a retirada das amostras e secagem com um pano úmido e realizada as mensurações. Os resultados serão expressos conforme equações abaixo (Equações de 3 a 7) a partir do processo de mensuração das diferenças de massa das amostras.

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (3)$$

$$P = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \times 100 \quad (4)$$

$$\rho_s = \rho_w \cdot \frac{m_s}{m_{\text{sat}} - m_i} \quad (5)$$

$$\rho_{\text{sat}} = \rho_w \cdot \frac{m_{\text{sat}}}{m_{\text{sat}} - m_i} \quad (6)$$

$$\rho_r = \rho_w \cdot \frac{m_s}{m_s - m_i} \quad (7)$$

Em que: A é a absorção de água por imersão (%);

P é o Porosidade (%);

ρ_s é a massa específica da amostra seca (g/cm^3);

ρ_{sat} é a massa específica da amostra saturada (g/cm^3);

ρ_r é a massa específica real (g/cm^3);

ρ_w é a massa específica da água ($\approx 1 \text{ g}/\text{cm}^3$);

m_{sat} é a amostra saturada em água após imersão e fervura com a superfície seca (g);

m_s é a massa da amostra seca em estufa (g);

m_i é massa da amostra saturada imersa após fervura (g).

Para o cálculo da porosidade total foi calculada a massa específica teórica do pela média ponderada da massa específica dos materiais componentes das argamassas, conforme equações a Equação 8 e 9.

$$\rho_{\text{teórica}} = f_c \times \gamma_c + f_a \times \gamma_a + f_b \times \gamma \quad (8)$$

$$f_i = \frac{i}{1+a+b} \quad (9)$$

Em que: f_i = fração mássica do material, com $i = 1$ para cimento, $i = a$ para agregado, $i = b$ para adição

$\rho_{\text{teórica}}$ = massa específica teórica (g/cm^3)

a = proporção de agregado miúdo em relação à massa de cimento

b = proporção da adição mineral em relação à massa de cimento

γ_c = massa específica do cimento (g/cm^3)

γ_a = massa específica do agregado miúdo (g/cm^3)

γ_b = massa específica da adição mineral (g/cm^3)

A partir do Teorema de Arquimedes, os resultados do ensaio de absorção por imersão e a massa específica teórica, calcula-se a porosidade total conforme Equação 10. Como limitação do método, vale ressaltar que o cálculo pode superestimar a porosidade total visto que o mesmo desconsidera a quantidade de água na mistura quando da inferência da $\rho_{\text{teórica}}$.

$$P_t = \left[1 - \left(\frac{m_s}{\rho_{\text{teórica}} \times (m_{\text{sat}} - m_i)} \right) \right] \times 100 \quad (10)$$

Em que: P_t = porosidade total (%)

m_s é a massa da amostra seca em estufa (g);

m_{sat} é a amostra saturada em água após imersão e fervura com a superfície seca (g);

m_i = massa da amostra saturada imerso em água após fervura (g)

$\rho_{\text{teórica}}$ = massa específica teórica (g/cm^3)

- **Estudo da carbonatação acelerada:** foram utilizados 3 corpos de prova prismáticos (4x4x8 cm) por tipo de resíduo, executando-se o ensaio baseado nas recomendações da CPC-18 (RILEM, 1988) e ISO 1920-12 (International Organization for Standardization, 2015). Após a cura de 98 dias, os corpos de prova foram inseridos em ambiente com condições de 27 ± 2 °C e umidade relativa entre 50 e 70%, por 5 dias, para equilíbrio de temperatura e umidade. Posteriormente, os corpos de prova foram mantidos em câmara de carbonatação acelerada, com $3 \pm 0,5$ % de concentração de CO₂, em temperatura de 27 ± 2 °C e umidade de 65 ± 5 % constantes, por 68 dias. Após este período, as amostras foram seccionadas longitudinalmente, sendo aspergida a solução de fenolftaleína (concentração de 1%) em todas as faces do corpo de prova. Em função da utilização de cimento CP-V e a eficiência no empacotamento das amostras, a profundidade de carbonatação foi diminuta e a mensuração por paquímetro digital ficou inviabilizada. Neste sentido, foram tiradas fotos com escala das amostras após aplicação da fenolftaleína, as imagens foram transpostas para o programa AutoCad Autodesk via inserção de imagem tipo “Raster Image Reference”, aplicada a escala real na imagem e mensurada a profundidade de carbonatação através do programa. A profundidade de carbonatação foi determinada pela média de 10 medidas da região incolor da superfície de corte em cada seção.
- **Ataque de cloretos:** foram utilizados três corpos de prova prismáticos (4x4x8 cm) por tipo de resíduo. Após a cura de 98 dias, os CP's foram imersos em solução de água deionizada misturada a uma concentração de 3% de NaCl do volume de água e permaneceram nesta exposição por 68 dias. Após o término do período de exposição, os CP's foram partidos ao meio e deixados por 24hrs em ambiente natural do laboratório para secagem natural. Em seguida, foi aspergido uma solução de nitrato de prata para análise da penetração de cloretos através do método colorimétrico. Aguardou-se pelo período de uma hora para reação da solução e foi realizada as imagens das amostras. Para manter a padronização de método para comparação com o ensaio de carbonatação acelerada e facilitar a visualização dos limites de penetração de cloretos, a mensuração não foi realizada via paquímetro digital. A identificação da profundidade de penetração, em algumas amostras, ficaram suaves e de difícil visualização. Assim, para mensuração da penetração de cloretos foram tiradas fotografias com escala das amostras após

aplicação do Nitrato de Prata. As imagens foram importadas para o programa AutoCad Autodesk via inserção de imagem tipo “Raster Image Reference”, aplicada a escala real na imagem e medida a profundidade de penetração dos cloretos através do programa. A profundidade foi determinada pela média de 8 medidas da região incolor da superfície de corte em cada seção.

- **Resistência à compressão axial:** seguiu-se os procedimentos da NBR 5739 (ABNT, 2018) e da norma Europeia EN 12390-3 (CEN, 2009), sendo utilizados 5 corpos de prova cúbicos, com 4 centímetros de aresta, para cada material (controle, mármore, granito e são Tomé). Os corpos de prova foram rompidos em uma máquina universal de ensaios EMIC Shimadzu Autograph AGS-X 300kN, com velocidade de carregamento de $(0,45 \pm 0,15)$ MPa/s. Idades analisadas foram 7, 28 e 98 dias. As resistências a compressão foram calculadas conforme Equação 11.

$$R_c = \frac{F_c}{1\ 600} \quad (11)$$

Onde: R_c = resistência a compressão em MPa;

F_c = carga máxima aplicada em N;

1 600 é área da seção considerada quadrada do dispositivo de carga 40 mm x 40 mm, em milímetros quadrados

- **Resistência à tração na flexão:** baseou-se na norma NBR 12142 (ABNT, 2010), sendo utilizados 3 corpos de prova prismáticos (4x4x16cm), para cada material. Os corpos de prova foram rompidos em máquina universal de ensaios EMIC Shimadzu Autograph AGS-X 300kN, com velocidade de carregamento de $(1,00 \pm 0,15)$ MPa/s para as idades de idades de 7, 28 e 98 dias. As resistências a flexão foram calculadas conforme Equação 12.

$$R_f = \frac{1,5 F_f L}{40^3} \quad (12)$$

Onde: R_f = resistência a tração na flexão em MPa;

F_f = é a carga aplicada verticalmente no centro do prisma, em N;

L = distância entre os suportes em mm

- **Microestrutura:** uma amostra cubica de aproximadamente 1cm de aresta para cada resíduo e uma para a controle foi retirada da seção interna de um CP prismático com corte em máquina de corte com disco de serra diamantado. Para a preparação

da amostra, a seção retirada foi colocada em uma fôrma de silicone, aplicado a resina e aguardada a sua secagem para desforma. Após a desforma foi realizado o lixamento em uma das faces da amostra resinada (face a ser visualizada no MEV), com água, em lixadeira de bancada utilizando-se quatro lixas distintas (100, 300, 600, 1200) girando 90° a cada mudança de lixa. Posteriormente, a amostra foi inserida em álcool etílico (100%) e colocada em um equipamento de ultrassom para limpeza da amostra. Em seguida, foi realizado polimento da face da amostra a ser visualizada com 3 panos de polimento e pasta de diamante. Para finalizar a preparação, após polimento, a amostra foi inserida novamente em álcool etílico 100% e deixada para secar ao ar. Após preparação, foram aplicadas nas amostras fita de carbono e submetidas às análises de MEV no Equipamento TM4000Plus Hitachi para realizar a análise da zona de transição da matriz e identificação de poros. As imagens foram realizadas utilizando feixe de elétrons retroespalhados, com tensão de 15 kV e distância de trabalho de 10 mm. Posteriormente, foi realizado um mapeamento químico com detector EDS Micsf x-Stream-2 Oxford para avaliar a distribuição dos elementos nas amostras.

5 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo são apresentados os resultados e análises da caracterização dos resíduos de rochas ornamentais (mármore, granito e pedra são tome) e do cimento e das propriedades nos estados fresco e endurecido das argamassas propostas.

5.1 Etapa 1: Caracterização dos materiais

5.1.1. Caracterização química e mineralógica

A Tabela 5 apresenta o resultado da composição química dos resíduos de rochas ornamentais estudados (mármore, granito e pedra São Tomé) e do cimento. Nota-se que as composições químicas dos resíduos se diferem significativamente entre os tipos de resíduos estudados e entender a influência desta variação nas propriedades dos compósitos cimentícios se faz de grande relevância.

Tabela 5- Composição química dos resíduos e do cimento (%)

Material	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	C	S	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Demais Compostos	PF
Cimento	20,60	5,49	2,74	60,10	1,20	1,33	0,85	0,12	0,64	0,72	4,60
Mármore	6,48	<0,10	0,08	32,80	-	-	19,60	<0,10	0,01	<0,20	40,87
Granito	74,80	13,60	3,88	1,72	-	-	0,59	2,87	3,62	<0,20	-0,02
São Tomé	95,00	1,70	1,11	0,81	0,24	0,01	0,42	0,11	0,44	<0,20	1,17

Fonte: Elaborado pela autora.

O resíduo proveniente do mármore apresenta como composto químico principal Óxido de Cálcio (CaO) e Óxido de Magnésio (MgO), com menos relevância, o mármore apresenta um pouco de Dióxido de Silício (SiO₂). O Granito apresenta composto químico principal Dióxido de Silício (SiO₂) e quantidade significativa de Óxido de Alumínio (Al₂O₃). Vale ressaltar que também apresenta em quantidades menores Óxido de Ferro (Fe₂O₃), Óxido de Sódio (Na₂O) e Óxido de Potássio (K₂O). A pedra São Tomé, por sua vez, é composta quase que totalmente de SiO₂.

Os resultados encontrados de composição química corroboram os resultados encontrados na Literatura Científica. As proporções químicas dos compostos encontrados nos resíduos estudados na literatura científica apresentam uma variação considerável e a composição química obtida no mármore desta pesquisa se aproxima muito do resultado encontrado por Kabeer *et al.* (2018), Kumar *et al.* (2020) e Singt *et al.* (2019).

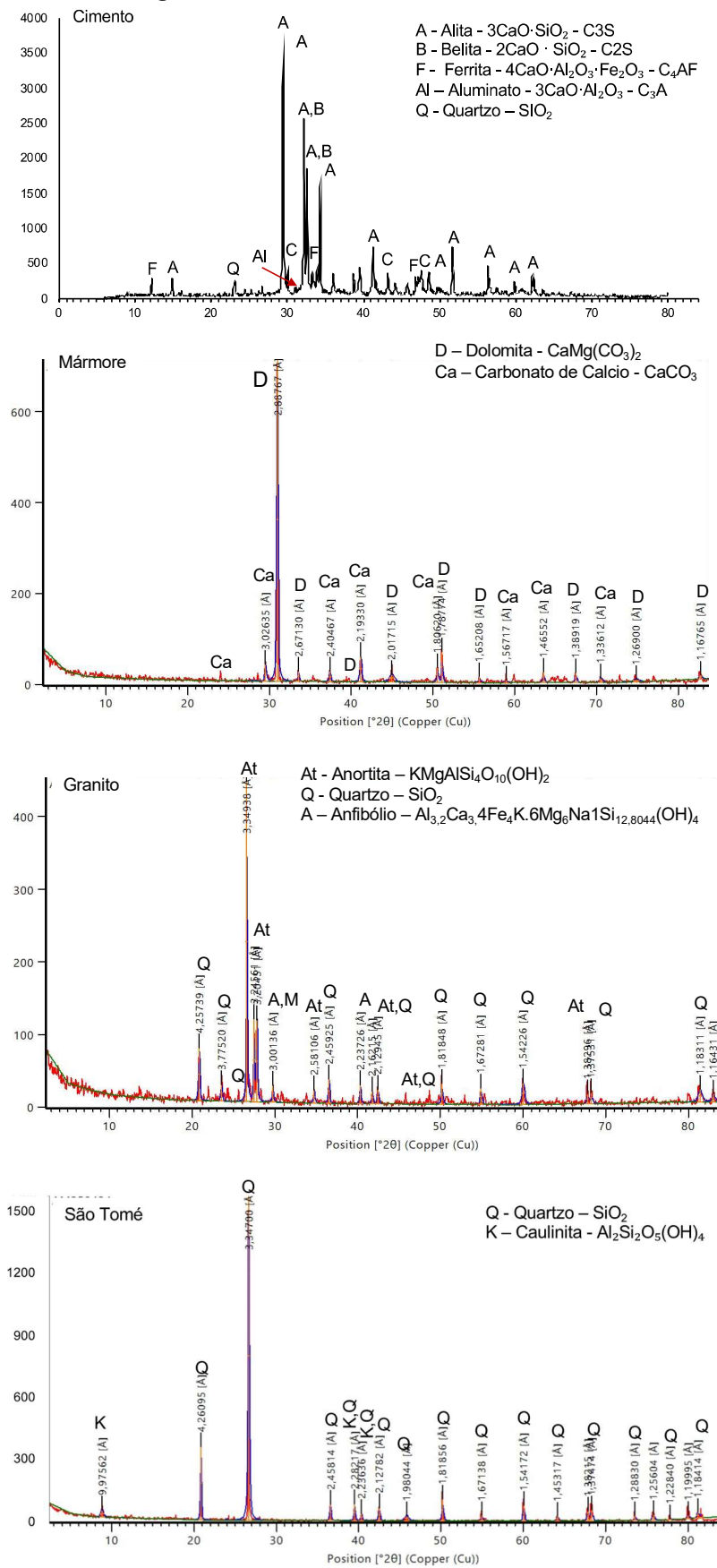
As composições químicas referentes aos granitos encontrados na literatura científica apresentam menor variação de proporção de composição em comparação ao mármore. Dentre a Literatura científica estudada os resultados encontrados para o granito se aproximam muito dos obtidos por Gupta *et al.* (2018) e Sadek *et al.* (2016). Apresenta também certa proximidade com Singh *et al.* (2016) e Karimipour *et al.* (2021), sendo os dois primeiros mais próximos.

Quanto a pedra São Tomé, visto que ainda é uma rocha pouco explorada, encontrou-se apenas uma bibliografia que apresentava sua composição química (Carvalho *et al.*, 2019). A composição química da pedra São Tomé estudada nesta pesquisa é um quartzito mais puro em comparação ao resultado obtido por Carvalho *et al.* (2019). Enquanto na Literatura a composição química compreende 80% de Dióxido de Silício (SiO_2) esta pesquisa o resíduo apresenta 95%. Em Carvalho *et al.* (2019) o resíduo ainda apresenta quantidade significativa de Óxido de Alumínio (Al_2O_3), 15,9% enquanto nesta pesquisa 1,7%.

A Figura 17 apresenta os resultados do ensaio de Difração de Raio X (DRX) realizado para o cimento e os resíduos estudados (mármore, granito e pedra São Tomé). Este ensaio permite o entendimento sobre a composição mineralógica dos materiais e sua correlação, aliada ao FRX, com a reatividade dos compostos.

Os resultados obtidos no DRX corroboram a literatura científica (BACARJI, *et al.*, 2013; ELYAMANY *et al.*, 2014; GUPTA, *et al.*, 2018) uma vez que os materiais utilizados apresentam alta cristalinidade. Nota-se que o mármore é composto por Dolomita e Carbonato de Cálcio, o Granito é majoritariamente composto por Anortita e Quartzo e a pedra São Tomé é majoritariamente composta por Quartzo. Os resultados do DRX encontrados corroboram os resultados de Song, *et al.* (2022) e Sadek, *et al.*, (2016) para mármore e Gupta, *et al.*, (2018), Sadek, *et al.*, (2016) para granito. Já em Pereira, *et al.*, (2022) apresentam-se algumas pequenas distinções com a ausência da Calcita e Dolomita e a presença de Muscovita e Microclina não encontrados nas amostras utilizadas nesta dissertação. Em Gado, *et al.* (2022) e Bacarji, *et al.* (2013) o uso do resíduo misturado de granito e mármore demonstra um resultado misto com o encontrado aqui. Em relação a pedra São Tomé não foram encontrados estudos que realizaram tal ensaio para comparação.

Figura 17 – Resultados DRX dos materiais

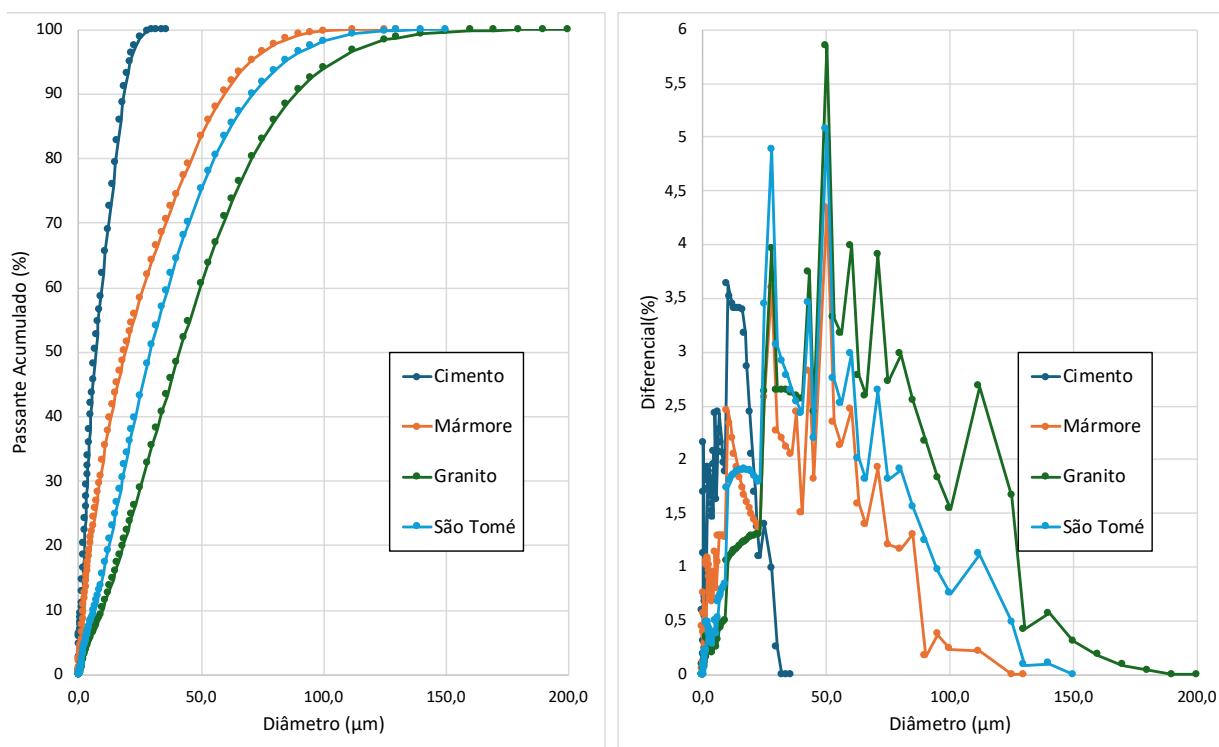


Fonte: Elaborado pela autora.

A presença destes minerais sugere a cristalinidade dos resíduos, o que legitima a atuação destes materiais em compósitos cimentícios como filler. Tem-se já conhecido, que quando aplicados em matrizes cimentícias, os resíduos de mármore e granito atuam como um material de preenchimento inerte quimicamente, tipo filler, o que produz um efeito de preenchimento de poros (SADEK, *et al.*, 2016). A ação do filler cumpre a função de preenchimento de espaços pela sua atuação física. Isso possibilita uma densificação da matriz cimentícia, o selamento e interrupção da interconexão de poros podendo gerar compósitos com melhores desempenhos. O efeito filler pode acelerar a hidratação do cimento e melhorar a zona de transição na interface pasta/agregado. Além disso, o efeito filler pode melhorar a estrutura desta zona de transição e influenciar positivamente o empacotamento e a estabilidade das matrizes (PEREIRA, *et al.*, 2022). Neste sentido, os resultados da composição química e mineralógica dos resíduos corroboram a aplicação dos resíduos na forma de uma adição mineral do tipo filler, podendo potencializar as performances físicas dos compósitos cimentícios.

5.1.2. Caracterização física

A Figura 18 apresenta a distribuição granulométrica discreta e acumulada do cimento e dos resíduos. Nota-se que as dimensões das partículas dos resíduos são maiores que as do cimento, contudo, apresentam dimensões de granulometrias favoráveis para atuação como adição mineral do tipo filler. Na distribuição diferencial é possível perceber que as posições dos picos de acumulação de partículas dos três resíduos são similares. O que sofre variação seria a quantidade acumulada em cada diâmetro, sendo que o mais próximo do cimento seria o mármore. Os resíduos utilizados não passaram por processo de cominuição para utilização no estudo e, apesar de serem recolhidos de locais distintos, apresentam curvas granulométricas definidas pela dureza do material, visto que os três resíduos foram gerados pelo mesmo processo de beneficiamento das rochas. Neste sentido, os picos registrados no gráfico diferencial ocorrem nas mesmas regiões.

Figura 18 – Distribuição granulométrica acumulada e diferencial do cimento e MGSR

Fonte: Elaborado pela autora.

Na Tabela 6 é apresentada a granulometria através dos diâmetros D_{10} , D_{50} e D_{90} , Área Superficial Específica (ASE) e Porosidade do cimento e dos MGSR.

Tabela 6 - Diâmetros D_{10} , D_{50} e D_{90} , Área superficial específica e Porosidade do cimento e dos MGSR

Material	D_{10} (μm)	D_{50} (μm)	D_{90} (μm)	$D_{\text{médio}}$ (μm)	Densidade (g/cm^3)	ASE (m^2/g)	Volume do poro (cm^3/g)
Cimento	1,26	6,91	18,52	8,65	3,055	1,2058	0,0049
Mármore	2,26	18,95	59,30	25,70	2,764	1,6415	0,0060
Granito	9,68	41,20	88,40	45,92	2,889	0,4112	0,0014
São Tomé	6,54	29,21	71,11	34,80	2,779	0,6978	0,0026

Fonte: Elaborado pela autora.

Verifica-se que dentre os resíduos estudados o mármore que se apresenta com menor granulometria e o granito com a maior. Para o mármore mais de 90% das partículas do resíduo são menores que 60 μm , para a pedra São Tomé corresponde a 75 μm e para o granito 89 μm (sendo mais de 50% menor que 42 μm). O resultado de granulometria encontrado corrobora o uso como adição mineral visando melhor preenchimento para um empacotamento aprimorado. Os resultados encontrados de granulometria também indicam o uso dos MGSR sem necessidade de cominuição, isso propicia um ganho energético quando da sua aplicação.

Na A situação registrada corrobora os resultados encontrados na literatura científica no sentido em que registra pequenas variações de granulometria em função da rocha adotada. Apesar da similaridade nos aspectos relacionados a diferenciação granulométrica entre os diferentes resíduos, notou-se uma variação nos resultados entre os materiais avaliados. Vale ressaltar que com maiores diâmetros registrados na Literatura, os resultados nos compósitos já foram favoráveis, neste sentido, entende-se que os resultados desta dissertação têm potencial ainda maior de melhorias nos compósitos estudados. No estudo de Seghir *et al* (2018) o resíduo de mármore apresenta uma granulometria de D_{90} correspondendo a 80 μm , bem maior que a registrada na Tabela 6 e ainda assim obteve resultados favoráveis no estudo. Em Almada *et al.* (2020) também registrou maior diâmetro (70% das partículas do apresentaram finura menor que 75 μm) e resultados benéficos nos compósitos, neste caso foram utilizados os resíduos de rochas ornamentais misturadas. Pereira *et al.* (2022) por outro lado, utilizando resíduo de granito e mármore misturados registrou diâmetros ainda menores que os de mármore encontrado aqui neste estudo (mais de 90% das partículas com diâmetro menor que 39,09 μm). A utilização do MGRS separadamente, não misturados, possibilita entender o papel da granulometria no empacotamento das partículas, entendendo o potencial de densificação da matriz, preenchimento de poros e quais possibilitam melhores resultados de resistências mecânicas e indicadores de durabilidade. Os resultados obtidos nos ensaios, analisados em conjunto à Literatura Científica, permite entender que a origem da rocha utilizada interfere diretamente na granulometria da adição e com impactos direto sobre o empacotamento e densificação da matriz.

Percebe-se que densidade, ASE e porosidade são maiores nas partículas de cimento que nas dos resíduos de granito e pedra São Tomé. Contudo, o resíduo de mármore apresenta maior ASE e porosidade que o cimento, sendo ele o que apresenta a menor densidade entre todos os finos avaliados. O resíduo de mármore pode conter partículas menores que as capturadas pelo ensaio de granulometria. A avaliação da morfologia das partículas (feita posteriormente) através de microscopia possibilita um entendimento melhor desta correlação. Além disso, maiores áreas superficiais específicas geram maiores demandas por água e favorecem os pontos de nucleação (ALMADA *et al.*, 2020)

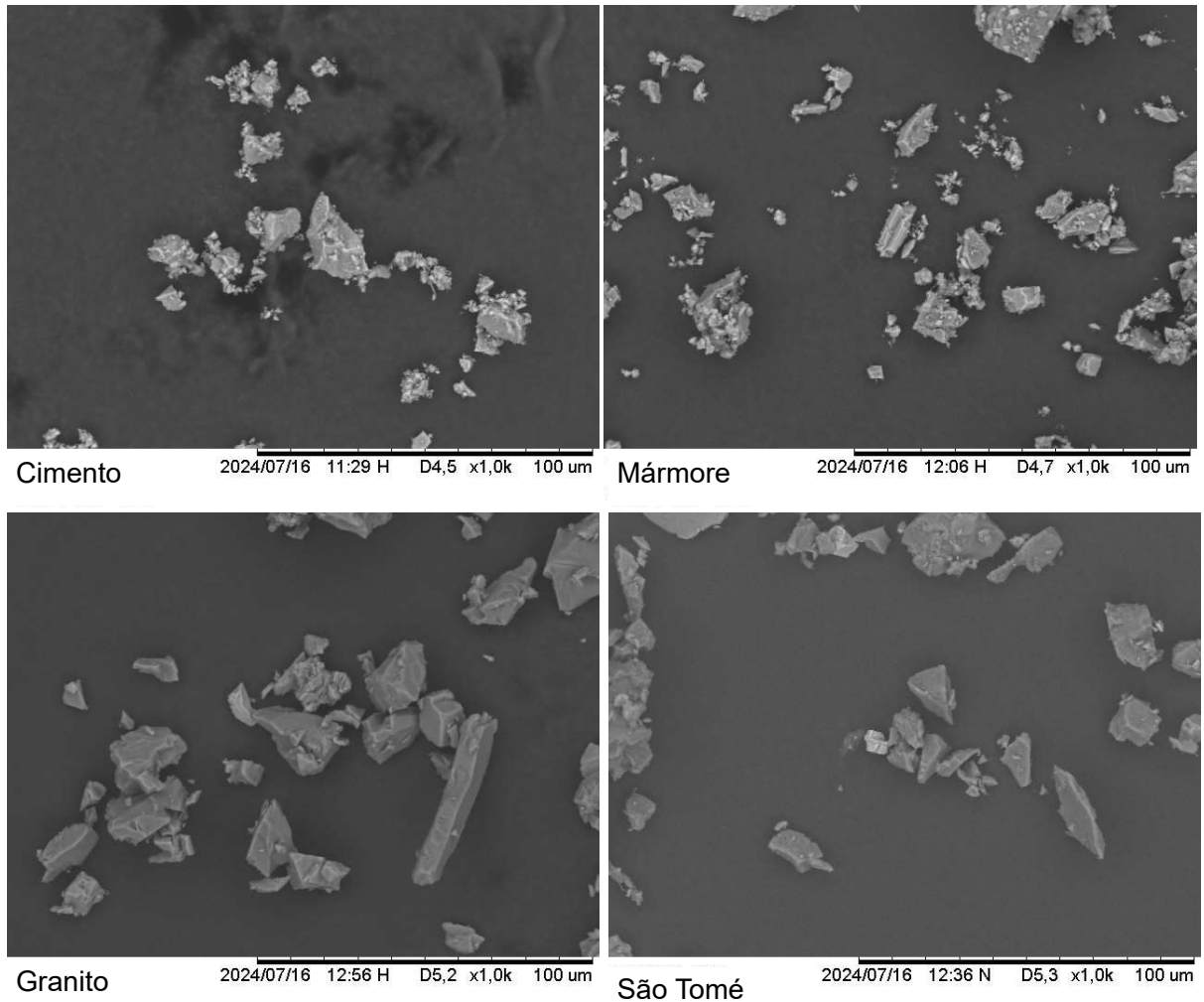
Figura 19 é possível notar a diferenciação de granulometria registrada, observa-se que as imagens de MEV do cimento e do mármore apresentam partículas de menores diâmetros no entorno das partículas maiores. Ao mesmo tempo em que, na mesma escala de imagem, as partículas de pedra São Tomé e, ainda mais evidente, nas partículas de granito apresentam superfícies mais lisas e limpas com menor quantidade de material particulado em seu entorno.

A situação registrada corrobora os resultados encontrados na literatura científica no sentido em que registra pequenas variações de granulometria em função da rocha adotada. Apesar da similaridade nos aspectos relacionados a diferenciação granulométrica entre os diferentes resíduos, notou-se uma variação nos resultados entre os materiais avaliados. Vale ressaltar que com maiores diâmetros registrados na Literatura, os resultados nos compósitos já foram favoráveis, neste sentido, entende-se que os resultados desta dissertação têm potencial ainda maior de melhorias nos compósitos estudados. No estudo de Seghir *et al* (2018) o resíduo de mármore apresenta uma granulometria de D_{90} correspondendo a 80 μm , bem maior que a registrada na Tabela 6 e ainda assim obteve resultados favoráveis no estudo. Em Almada *et al.* (2020) também registrou maior diâmetro (70% das partículas do apresentaram finura menor que 75 μm) e resultados benéficos nos compósitos, neste caso foram utilizados os resíduos de rochas ornamentais misturadas. Pereira *et al.* (2022) por outro lado, utilizando resíduo de granito e mármore misturados registrou diâmetros ainda menores que os de mármore encontrado aqui neste estudo (mais de 90% das partículas com diâmetro menor que 39,09 μm). A utilização do MGRS separadamente, não misturados, possibilita entender o papel da granulometria no empacotamento das partículas, entendendo o potencial de densificação da matriz, preenchimento de poros e quais possibilitam melhores resultados de resistências mecânicas e indicadores de durabilidade. Os resultados obtidos nos ensaios, analisados em conjunto à Literatura Científica, permite entender que a origem da rocha utilizada interfere diretamente na granulometria da adição e com impactos direto sobre o empacotamento e densificação da matriz.

Percebe-se que densidade, ASE e porosidade são maiores nas partículas de cimento que nas dos resíduos de granito e pedra São Tomé. Contudo, o resíduo de mármore apresenta maior ASE e porosidade que o cimento, sendo ele o que apresenta a menor densidade entre todos os finos avaliados. O resíduo de mármore

pode conter partículas menores que as capturadas pelo ensaio de granulometria. A avaliação da morfologia das partículas (feita posteriormente) através de microscopia possibilita um entendimento melhor desta correlação. Além disso, maiores áreas superficiais específicas geram maiores demandas por água e favorecem os pontos de nucleação (ALMADA *et al.*, 2020)

Figura 19 – Imagens de MEV das partículas do MGSR e do cimento (100 μm)



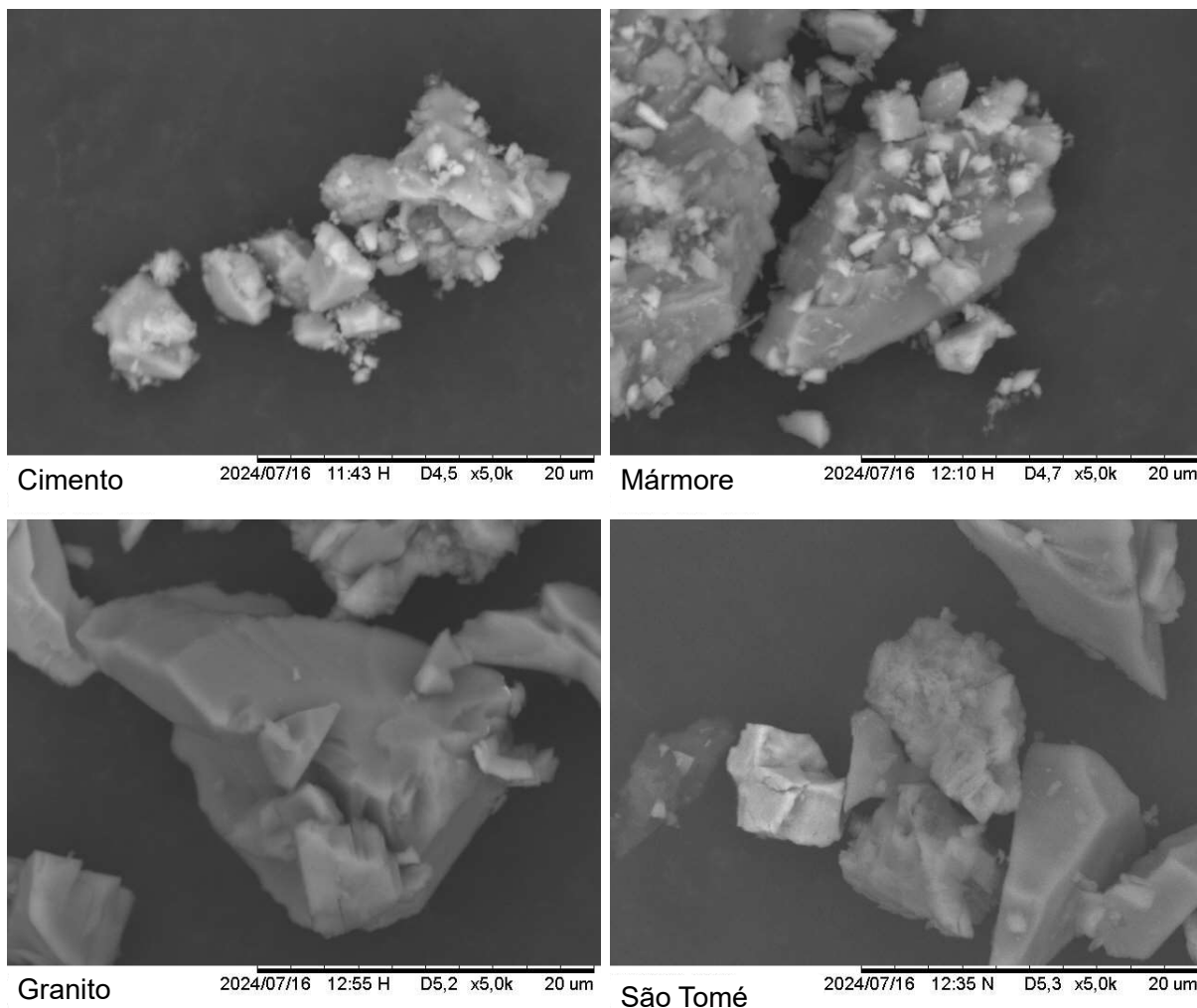
Fonte: Elaborado por LAB-MIS CEFET-MG em 16-07-2024.

Conforme pode ser visualizado na bibliografia (Tabelas de 1 a 4 da revisão), os resultados de densidade encontrados para o Mármore se aproximam dos de Sadek *et al.* (2016), Seghir *et al.* (2019) e Sardinha *et al.* (2016), o granito que se aproxima mais de Karimipour *et al.* (2021) e o de Pedras São Tomé com Carvalho *et al.* (2019).

5.1.3. Morfologia das partículas

Para avaliação da morfologia das partículas foi realizada imagens de MEV de bancada, conforme Figura 20 e Figura 21.

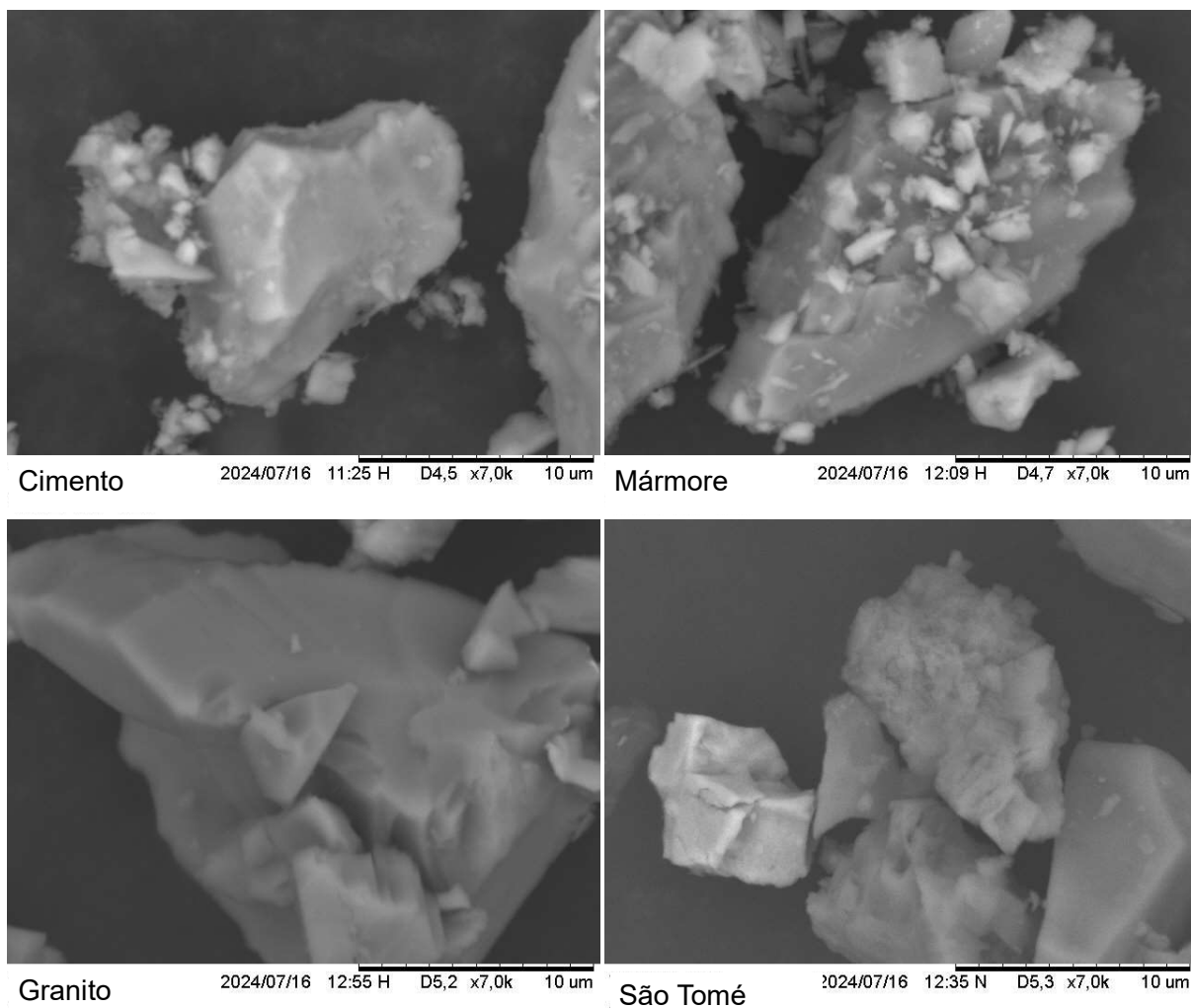
Figura 20 - Imagens de MEV da superfície das partículas dos resíduos e do cimento (20µm)



Fonte: Elaborado por LAB-MIS CEFET-MG em 16-07-2024.

Constata-se uma diferenciação significativa na morfologia das partículas. Os resíduos de granito e São Tomé apresentam superfícies mais lisas e compactas em relação a superfície das partículas do resíduo de mármore. A morfologia das partículas do resíduo de mármore apresenta mais irregularidades e menor granulometria em comparação as demais partículas. Esta visualização morfológica corrobora os resultados de granulometria, densidade, porosidade e área superficial específica encontrados anteriormente. Nota-se também que o formato das partículas de granito e pedra São Tomé se apresentam com arestas mais bem definidas em comparação ao mármore.

Figura 21 - Imagens de MEV da superfície das partículas dos resíduos e do cimento (10µm)



Fonte: Elaborado por LAB-MIS CEFET-MG em 16-07-2024.

Através da microscopia e aliado às características físicas dos MGRS, pode-se perceber que os resíduos adotados são favoráveis a serem utilizados como adição mineral sendo, a princípio o mármore como melhor do ponto de vista de contribuição a hidratação do cimento e o granito sendo o menos favorável. Vale ressaltar que a dureza dos minerais presentes no resíduo também pode atuar nas propriedades no estado endurecido, ainda a serem discutidas neste trabalho posteriormente.

De acordo com Fossen (2018) as características mecânicas e elásticas das rochas de origem, bem como dos minerais presentes podem ser resumidas nas tabelas Tabela 7 e Tabela 8.

Tabela 7 – Razão de Poisson

Material	ν (Razão de Poisson)
Ferro	0,29
Borracha	quase 0,5
Quartzo	0,16
Sal	~0,38
Diamante	0,2
Calcário	0,15-0,3
Arenito	0,21-0,38
Folhelho	0,03-0,4
Gabro	0,2-0,4
Granito	0,1-0,25
Anfibolito	0,1-0,33
Mármore	0,06-0,25

Fonte: Traduzido pela autora a partir de Fossen, 2018.

Estas características podem apresentar influências nos resultados das propriedades, principalmente nas relacionadas às resistências mecânicas. Neste sentido, a interferência destas características será ponderada posteriormente neste trabalho, após os resultados dos ensaios no estado endurecido.

5.2 Etapa 2: Dosagem dos materiais

O resultado da comparação via Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) entre as curvas das diferentes proporções de adição dos resíduos, cimento e areia com a curva do modelo de Andreasen e Andersen Modificado com módulo de distribuição $q = 0,30$ pode ser vista na Figura 22.

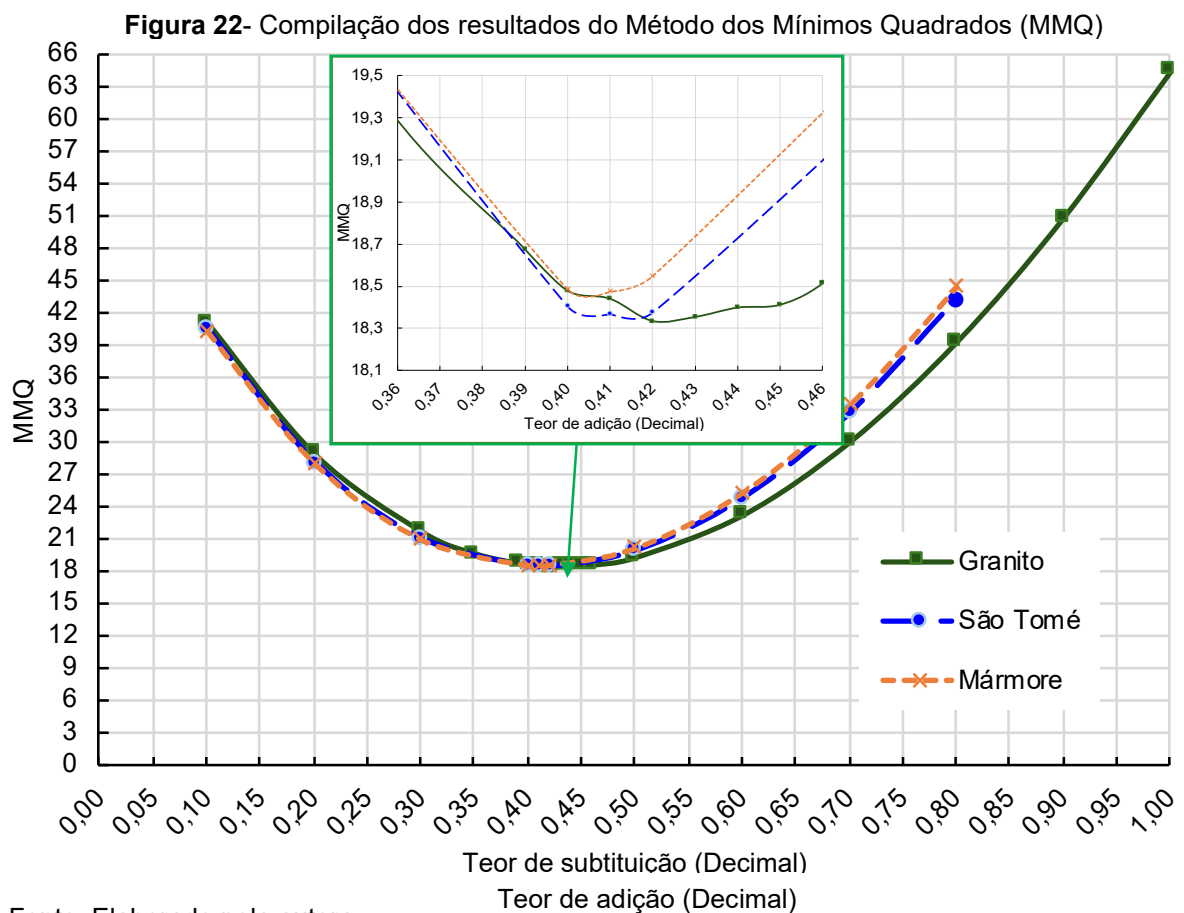
A partir do método do empacotamento de partículas adotado identifica-se o traço mais próximo da curva teórica para as argamassas estudadas são muito próximos para os três resíduos. Neste sentido, foi adotado para os três resíduos o teor de 40% (0,40) de resíduo sobre a massa de cimento sendo 1:3 a relação cimento para areia e de 0,40 de água/cimento. Desta forma, espera-se detectar com clareza a influência direta do tipo resíduo nos resultados obtidos.

O índice de consistência foi estabelecido em 200 ± 15 mm para a dosagem final. Ajustou-se o aditivo redutor de água para manter esta consistência, sendo os valores registrados na Tabela 9.

Tabela 8 – Registro do E (GPa)

Material	E (GPa)
Ferro	196
Borracha	0,01-0,1
Quartzo	72
Sal	40
Diamante	1.050-1.200
Calcário	80
Arenito	10-20
Folhelho	5-70
Gabro	50-100
Granito	~50
Anfibolito	50-110
Mármore	50-70

Fonte: Traduzido pela autora a partir de Fossen, 2018.



Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 9 – Medidas ensaio de índice de consistência (*Flow Table*) para definição de dosagem de aditivo

Mistura	Medida 01(mm)	Medida 02(mm)	Medida 03(mm)	Média(mm)
Controle	195	190	185	190
Granito	205	210	205	207
Mármore	190	195	200	195
São Tomé	200	205	195	200

Fonte: Elaborado pela autora.

Assim, ficou estabelecido o traço final adotado para cada uma das argamassas a serem estudadas e registrado na Tabela 10, as dosagens estão em proporção ao peso de cimento.

Tabela 10 – Dosagens finais das amostras

Material	Cimento	Resíduo	Areia	Água	Aditivo
Controle	1,000	0,000	3,000	0,400	0,012
Marmore	1,000	0,400	3,000	0,400	0,015
Granito	1,000	0,400	3,000	0,400	0,013
São Tomé	1,000	0,400	3,000	0,400	0,013

Fonte: Elaborado pela autora.

Na Percebe-se que a inserção de 40% de MGRS gerou redução do consumo de demais materiais (cimento, areia e água), sendo correspondente a 7,26% nas argamassas com adição de mármore, 6,89% com granito e 7,14% para pedra São Tomé. Destaca-se que esta redução do consumo de cimento tende a reduzir o impacto ambiental destes compósitos, associado a redução da extração de materiais primas não renováveis (calcário, sílica, areias, entre outros) e pela redução do volume resíduos de rochas ornamentais descartados no ambiente.

Tabela 11 apresenta-se o consumo por metro cúbico dos traços resultantes. Nota-se que para o mármore foi necessária uma quantidade de aditivo maior (15,92%), o que corrobora a caracterização física da partícula que possui ASE maior e uma superfície menos compacta. Para manter a trabalhabilidade, visto que a quantidade de água no traço é a mesma para todos os resíduos, foi necessário maior quantidade de aditivo redutor de água.

Percebe-se que a inserção de 40% de MGRS gerou redução do consumo de demais materiais (cimento, areia e água), sendo correspondente a 7,26% nas argamassas com adição de mármore, 6,89% com granito e 7,14% para pedra São Tomé. Destaca-se que esta redução do consumo de cimento tende a reduzir o impacto ambiental destes compósitos, associado a redução da extração de materiais primas

não renováveis (calcário, sílica, areias, entre outros) e pela redução do volume resíduos de rochas ornamentais descartados no ambiente.

Tabela 11 - Traço em gramas para a produção de 1m³ de argamassa

Material	Cimento	Resíduo	Areia	Água	Aditivo
Controle	530,932	0,000	1592,795	212,373	6,371
Marmore	492,374	196,950	1477,122	196,950	7,386
Granito	494,349	197,739	1483,046	197,739	6,427
São Tomé	493,013	197,205	1479,039	197,205	6,409

Fonte: Elaborado pela autora.

Optou-se pela realização da mistura no volume total dos corpos de prova de forma que houvesse uma moldagem única padronizada. Posteriormente, foi executado novamente o ensaio de mesa de espalhamento (*Flow Table*) os resultados foram registrados na Tabela 12.

Tabela 12 – Medidas ensaio de índice de consistência (*Flow Table*)

Mistura	Medida 01(mm)	Medida 02(mm)	Medida 03(mm)	Média(mm)
Controle	275	270	275	273
Granito	290	290	290	290
Mármore	275	285	275	278
São Tomé	290	305	300	298

Fonte: Elaborado pela autora.

Houve um aumento (aproximadamente 30%) da consistência (*Flow Table*) nos ajustes do traço em relação a moldagem das amostras. Acredita-se que a variação ocorreu em função variação na energia cinética aplicada na mistura para o ajuste (argamassadeira normatizada para ensaios de cimento) ser menor que a preparada com misturador acoplado a uma furadeira usada na moldagem das amostras. Constatou-se que ao usar um misturador acoplado à furadeira com velocidade mais alta houve a fluidificação da argamassa gerando um ganho (30%) nas consistências. Este ganho foi similar entre as amostras, assim, manteve-se o ajuste e foi considerado como adequado. Os resultados da mesa de espalhamento foram registrados e a moldagem dos corpos de prova prosseguiu conforme NBR's registradas na metodologia. Foi adotado o mesmo parâmetro de trabalhabilidade e considerou-se aceitável o índice de consistência de 285±15 mm para todas as amostras estudadas.

A incorporação de adições minerais em um compósito cimentício gera maiores demandas por água para uma mesma trabalhabilidade e estando a morfologias das partículas diretamente relacionada (CHEN, *et al.*, 2020). As partículas do resíduo de mármore apresentam superfície mais irregular que as de granito e São Tomé,

conforme mostrado nas imagens de MEV (Figura 20). Da mesma forma, a ASE do mármore apresenta-se maior em comparação aos demais resíduos de rochas ornamentais, o que corrobora os resultados da mesa de espalhamento (*Flow Table*) em que, para se manter a mesma trabalhabilidade, considerando fixada a quantidade de água, os compósitos com adição demandaram maior quantidade de aditivo sendo o mármore o maior deles.

5.3 Etapa 3: Propriedades no estado endurecido

Nesta seção do trabalho são apresentados os resultados dos ensaios relacionados aos índices físicos (absorção de água, porosidade, capilaridade), às propriedades mecânicas (resistência a compressão e tração na flexão) e de durabilidade (carbonatação e ataque de íons cloreto) das argamassas com adição resíduos de rochas ornamentais e será analisada a influência destas adições nos resultados obtidos.

5.3.1. Capilaridade

A taxa de penetração de água em compósitos cimentícios governa a taxa de transporte de agentes agressivos, visto que a umidade é o meio que conduz estes agentes danosos para o interior do compósito (ALMADA, 2021). Visto tal consideração, a avaliação da capilaridade e seus mecanismos são fatores importantes para entendimento da durabilidade da argamassa proposta.

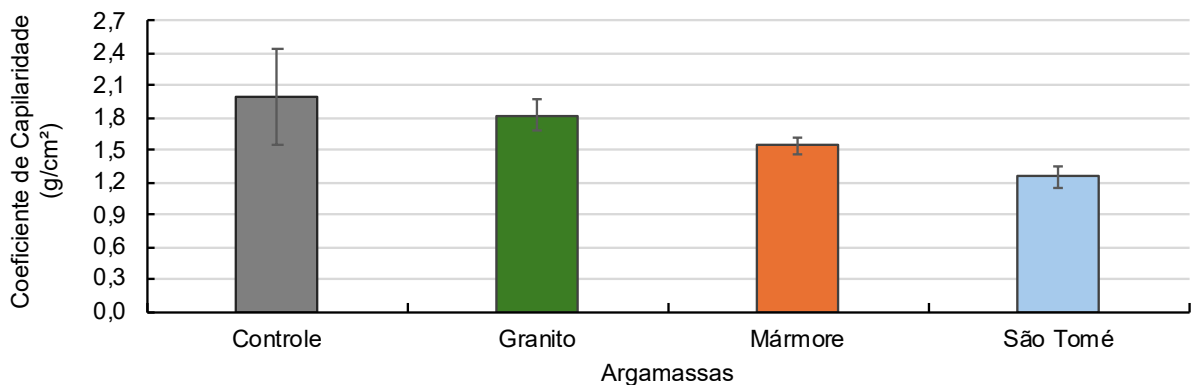
Nas A amostra com adição de granito apresentou uma redução de aproximadamente 8,5% na capilaridade, a de mármore 22,7% e a de pedra São Tomé uma redução de 37% e com desvio padrão expressivamente menor em todas as amostras com adição de MGSR. De acordo com PEREIRA *et al.* (2022), a adição de MGSR reduz a absorção de água por capilaridade e decresce a capilaridade, pois o efeito filler gera, além do preenchimento da matriz, uma desconexão dos poros. Apesar da ASE e volume de poros da partícula de pedra São Tomé estar mais próxima da partícula do granito do que em relação ao mármore, seu desempenho na capilaridade foi expressivamente melhor que o granito e o mármore.

Figura 23 e Figura 24 são apresentados os resultados do ensaio de capilaridade sendo a primeira com o registro do coeficiente de capilaridade e a segunda referente à absorção por capilaridade ao longo do tempo. Observa-se que

todas as argamassas com adição de resíduo apresentaram resultados iguais ou menores que a argamassa controle.

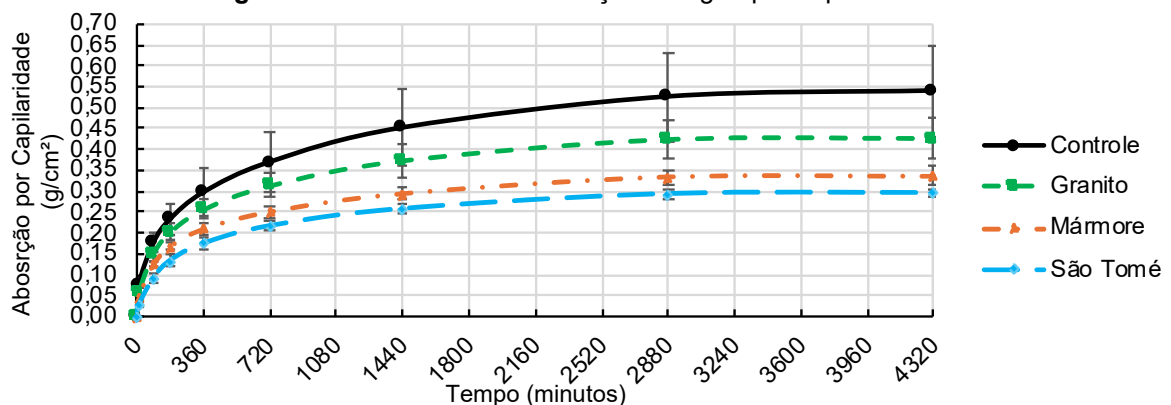
A amostra com adição de granito apresentou uma redução de aproximadamente 8,5% na capilaridade, a de mármore 22,7% e a de pedra São Tomé uma redução de 37% e com desvio padrão expressivamente menor em todas as amostras com adição de MGSR. De acordo com PEREIRA *et al.* (2022), a adição de MGSR reduz a absorção de água por capilaridade e decresce a capilaridade, pois o efeito filler gera, além do preenchimento da matriz, uma desconexão dos poros. Apesar da ASE e volume de poros da partícula de pedra São Tomé estar mais próxima da partícula do granito do que em relação ao mármore, seu desempenho na capilaridade foi expressivamente melhor que o granito e o mármore.

Figura 23 - Resultados do coeficiente de capilaridade



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 24 - Resultados da absorção de água por capilaridade



Fonte: Elaborado pela autora.

Nota-se também que as amostras com adição dos resíduos apresentam uma menor variação de absorção por capilaridade ao longo do tempo com uma estabilização a partir do tempo 2880 minutos (48 horas) enquanto a argamassa

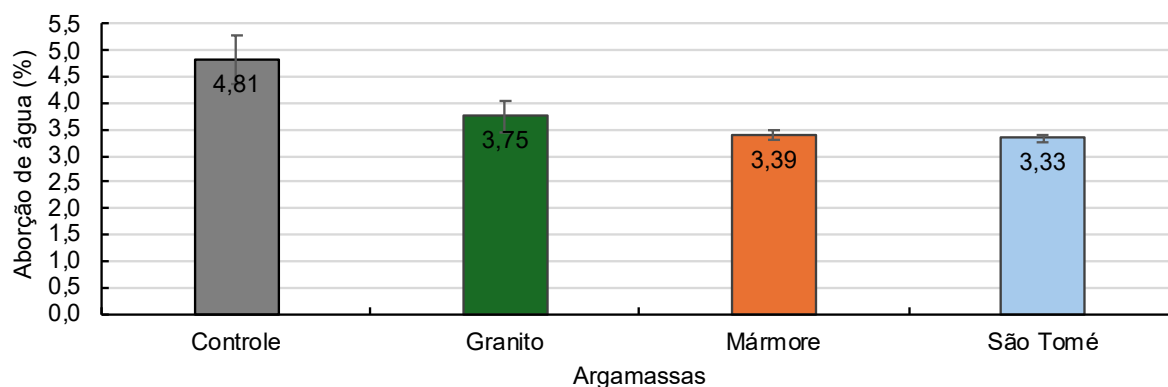
controle ainda registrou aumento na absorção por capilaridade até o tempo de 4320 minutos (72 horas). Esta correlação permite entender que as argamassas com adição de resíduos apresentam melhores comportamentos em ambientes que se demande menor conectividade de poros ou que a água do solo (umidade ascensional) possa ser um risco dentro do compósito. Vale também ressaltar que as maiores absorções registradas para os compósitos com adição de resíduo de rochas ornamentais estabeleceram-se até o tempo de 1440 minutos (24 horas), enquanto a argamassa controle ainda apresentava altos registros de absorção por capilaridade em 2880 minutos (48 horas), o dobro do tempo.

5.3.2. Absorção de água, porosidade e massa específica

A partir do mesmo conceito de transporte de agentes agressivos apresentado para a capilaridade, a permeabilidade e a relação com a conectividade de poros, são fatores importantes no entendimento da durabilidade da argamassa proposta. Na Figura 25 são apresentados os resultados de absorção de água por imersão. Todas as amostras com adição de resíduo apresentaram valores menores que a amostra controle. O compósito com adição de resíduo de granito apresentou redução de 22,04% na absorção de água por imersão em relação ao controle, o mármore aproximadamente 29,48% e o com resíduo de pedra São Tomé 30,80%. Visto linhas do desvio padrão, entende-se que mármore e São Tomé obtiveram resultados iguais e granito praticamente similar também com uma variação praticamente desprezível.

Os resultados encontrados corroboram os resultados apresentados no estudo de Sadek, *et al.* (2016) em que a incorporação da adição mineral com resíduos de mármore, granito e misturado resultou em diminuição da absorção de água em comparação à mistura com cimento sem adição.

Figura 25- Resultados do ensaio de absorção de água por imersão



Fonte: Elaborado pela autora.

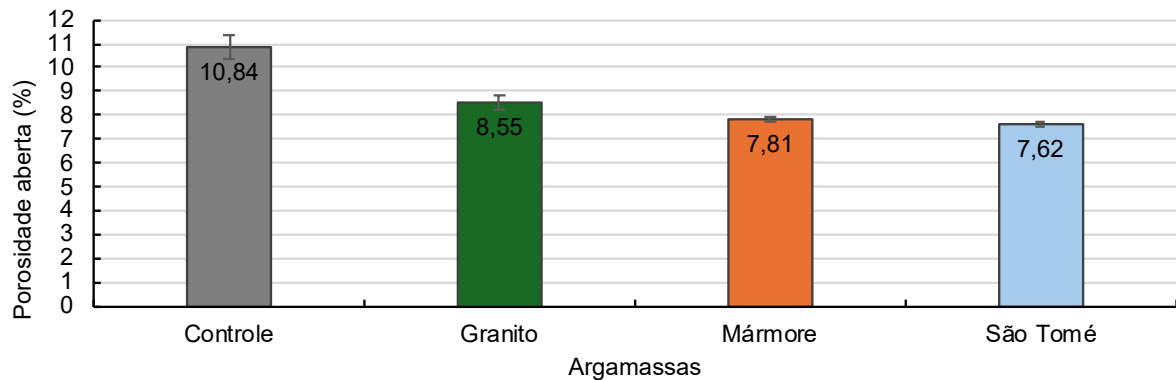
Sadek, *et al.* (2016) encontrou valores de absorção de água com resultado contrário ao registrado nesta dissertação. Os autores avaliaram individualmente a adição de granito e mármore, o resultado obtido apresentou uma redução de 22,6% para o mármore (3,84% de absorção de água) e de 50,2% na amostra com granito (2,47% de absorção de água) em relação ao controle. O resultado da argamassa com adição de resíduo de mármore desta dissertação apresentou resultado similar ao apresentado por Sadek, *et al.* (2016). Enquanto na argamassa com adição de granito o resultado de Sadek, *et al.* (2016) demonstrou melhores resultados. Vale ressaltar que o estudo de Sadek, *et al.* (2016) foi em concreto autoadensável e, neste sentido, as dosagens e as propriedades buscadas e analisadas são distintas dos objetivos desta dissertação. Em relação à pedra São Tomé, registrou-se o melhor resultado de todas as argamassas analisadas, com uma absorção de água por imersão de 3,33%.

De maneira geral, a literatura científica demonstra melhorias na absorção de água quando adicionado os resíduos de rochas ornamentais e os resultados obtidos nesta dissertação corroboram os dados da Literatura científica neste aspecto. Além disso, fica demonstrado que o resíduo de pedra São Tomé utilizado como adição em argamassas estruturais, ainda pouco explorado, demonstrou as melhorias no resultado de absorção de água por imersão em relação à argamassa controle. Em números absolutos, a argamassa com adição de resíduo de São Tomé apresentou o melhor resultado entre as argamassas. Contudo, a partir dos desvios registrados, pode-se considerar que as três argamassas com adição de resíduo tiveram resultados similares e superiores ao controle.

Na Figura 26 são apresentados os resultados de porosidade aberta obtidos no ensaio. Este índice físico se correlaciona aos resultados de absorção de água por

imersão. Nota-se uma redução significativa na porosidade aberta dos compósitos em comparação a amostra controle. A argamassa com adição de granito apresentou uma redução de 21,17% na porosidade aberta em relação a amostra controle, o mármore uma redução de 27,99% e a pedra São Tomé uma redução de 29,71%.

Figura 26- Resultados do ensaio de porosidade aberta

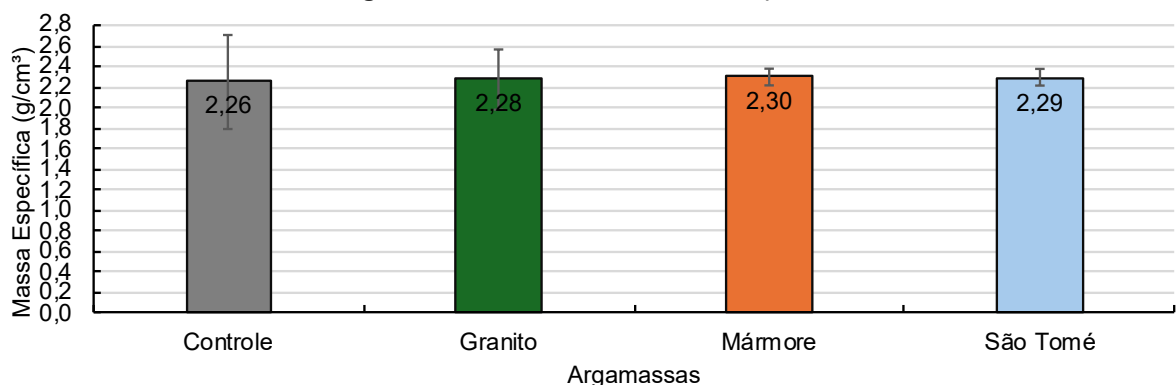


Fonte: Elaborado pela autora.

Os resultados obtidos para a porosidade corroboram os resultados de absorção de água por imersão e capilaridade. Estes resultados podem ser explicados através da metodologia de empacotamento adotada. A atuação dos resíduos como filler na matriz cimentícia gera uma maior densificação da matriz com o melhor preenchimento dos espaços vazios.

Na Figura 27 são apresentados os resultados de massa específica calculados.

Figura 27- Resultados de massa específica

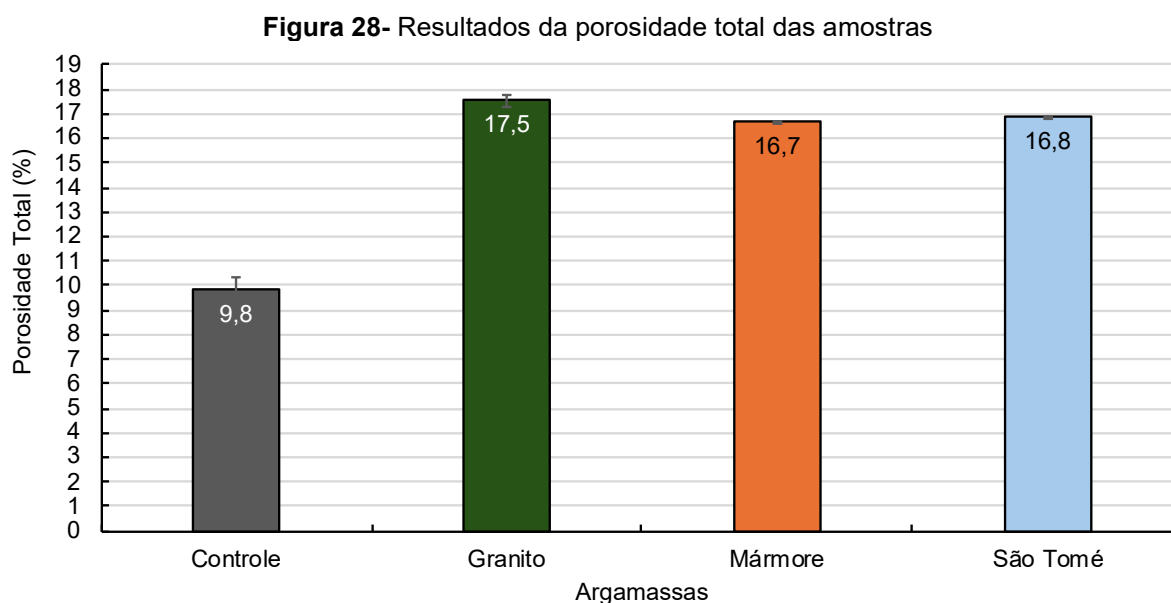


Fonte: Elaborado pela autora.

Constatou-se um leve aumento da massa específica (1,11%, 2,08%, 1,16% para granito, mármore e Pedrão São Tomé, respectivamente) com a inserção dos resíduos. Assim, percebe-se uma densificação da matriz, o que é favorável ao melhor

desempenho do compósito. Pelos resultados obtidos relacionados aos índices de penetração de água por capilaridade ou imersão, entende-se que deveria ocorrer uma maior densificação em relação a encontrada. Tal resultado sugere que houve uma clara mitigação da interconexão de poros nas amostras com adição dos resíduos.

Na Figura 28 é apresentada a porosidade total das argamassas estudadas. Os resultados encontrados confirmam o fato que a amostras com adição de resíduos resultaram em compósitos em que a interconexão dos poros foi interrompida. Os dados de porosidade total encontrados apresentam maiores para as argamassas com adição de resíduo, contudo, os resultados de absorção de água por imersão e capilaridade são expressivamente menores que a argamassa controle. Este fato é uma evidência que nas argamassas com adição de resíduo, apesar de uma porosidade total significativamente maior, a interconexão entre estes poros foi descontinuada.



Fonte: Elaborado pela autora.

Estes resultados de porosidade total também podem explicar o motivo dos resultados de massa específica não terem sido maiores conforme esperado. Acredita-se que este resultado de maior porosidade total pode estar relacionado a alguma reação do aditivo com os resíduos e gerado maior volume de ar incorporado. Situação esta que não interferiu na atuação filler do resíduo através do isolamento dos poros.

Em função do preenchimento e isolamento dos poros através da mitigação de sua interconexão pela adição filler, a penetração de água seja por capilaridade ou absorção é mitigada. O efeito benéfico da adição de resíduos de rochas ornamentais na redução da absorção de água é atribuído ao efeito filler que é responsável pela densificação da microestrutura e pela redução da porosidade do compósito cimentício (SADEK, *et al.*, 2016). Situação esta encontrada nos resultados obtidos.

5.3.3. Carbonatação acelerada

A Figura 29 apresenta as imagens registradas dos corpos de prova após a aspersão da solução de fenolftaleína para cada um dos compósitos estudados. A carbonatação em todas as amostras foi diminuta com difícil mensuração. Este resultado demonstra que os compósitos analisados apresentam bons indicativos de durabilidade e, além disso, nas amostras com adição de resíduo não se evidencia nenhuma perda de quesitos favoráveis do ponto de vista de carbonatação.

Pelas imagens é possível evidenciar que no compósito controle houve pontos de carbonatação centralizados no corpo de prova junto a alguns poros. Na Figura 30 foram ampliados, para melhor visualização, um dos pontos de carbonatação de poro interno identificados nas amostras controle. Isto sugere que alguns poros maiores (visíveis a olho nu) podem ter apresentado uma interconexão com o ambiente externo para passagem do CO₂. Já nas amostras que apresentam adições dos resíduos de rochas ornamentais, esta situação é menos evidente e até mesmo inexistente, indicando um melhor empacotamento com melhorias neste parâmetro de durabilidade.

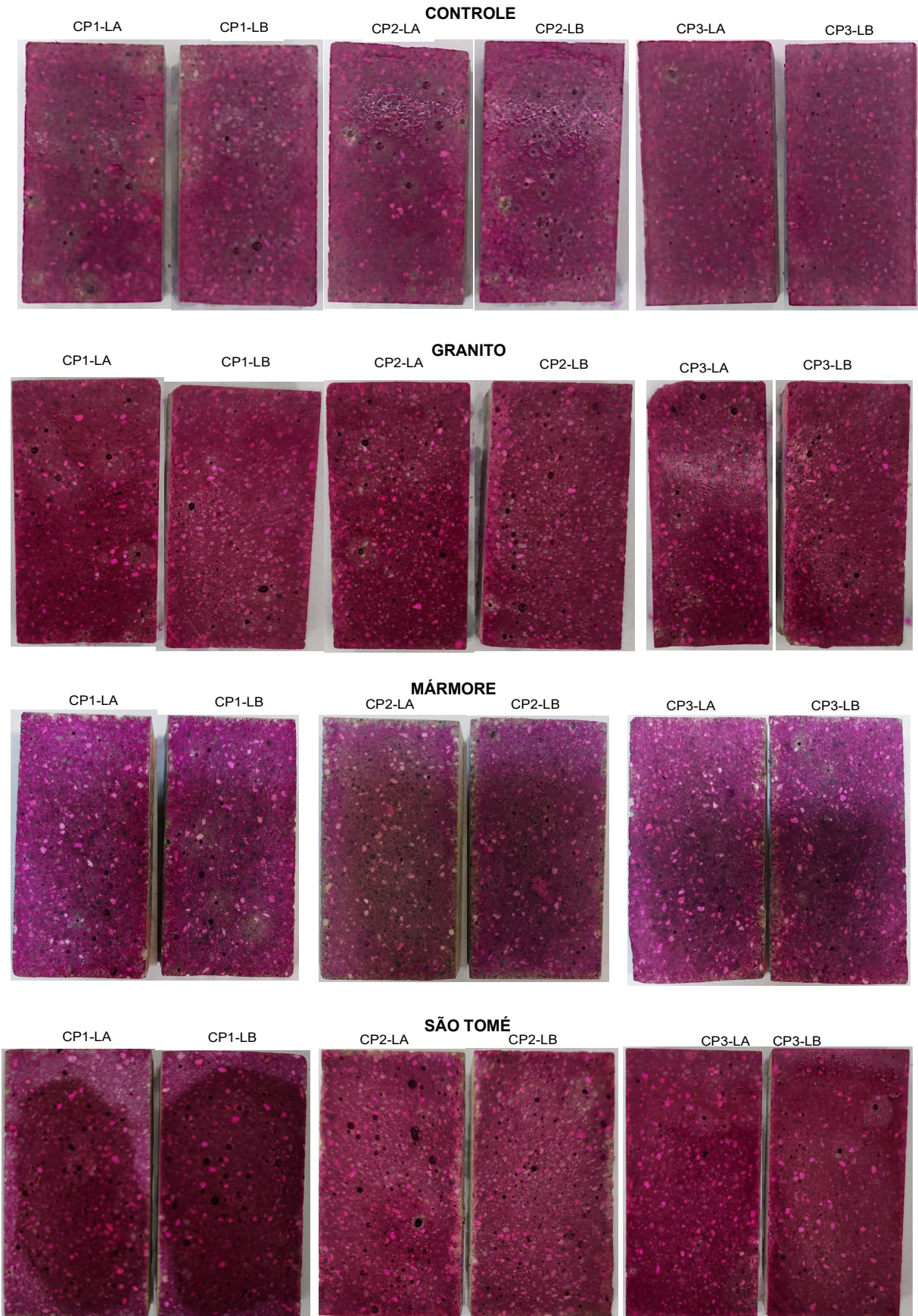
No Figura 31 é apresentado o resultado da mensuração da profundidade de carbonatação, através da média geral de medidas e das mensurações individualizadas. O resultado da profundidade de carbonatação demonstra que as adições de resíduos de granito e pedra São Tomé contribuíram positivamente nos resultados reduzindo-a em 75% e 50%, respectivamente. Já no caso do mármore se identificou situação contrária, houve um aumento de 25% na carbonatação.

Apesar da avaliação comparativa entre resíduos e controle apresentar variações, é importante ressaltar que a escala dos resultados foi ampliada e os resultados de carbonatação geral em todos os compósitos foram extremamente diminutos. A profundidade de carbonatação registrada nos compósitos estudados foi

ínfima, pois os resultados foram registrados em milímetros. Neste sentido, a partir da perspectiva da possibilidade de corrosão de armaduras devido a redução do pH associado ao processo de carbonatação, pode-se dizer que a adição do resíduo de rochas ornamentais não apresenta qualquer comprometimento ao compósito e ainda possibilitou melhora, quando analisado milimetricamente em dados absolutos, nas argamassas com as adições de granito e pedra São Tomé.

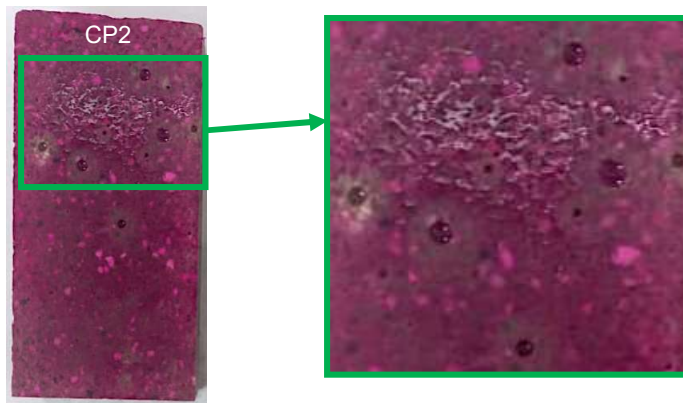
De acordo com Sanjuán, Andrade, & Cheyrezy (2003, *apud* Almada, 2021), os autores apresentam uma correlação entre a carbonatação acelerada e a natural e estabeleceram que cada 6 dias na câmara de carbonatação acelerada correspondem a 1 ano de carbonatação natural. Neste sentido, esta pesquisa avalia a carbonatação ocorrida correspondente a aproximadamente 11 anos de exposição natural.

Figura 29 – Imagem dos corpos de prova carbonatados após aspersão da solução de fenolftaleína



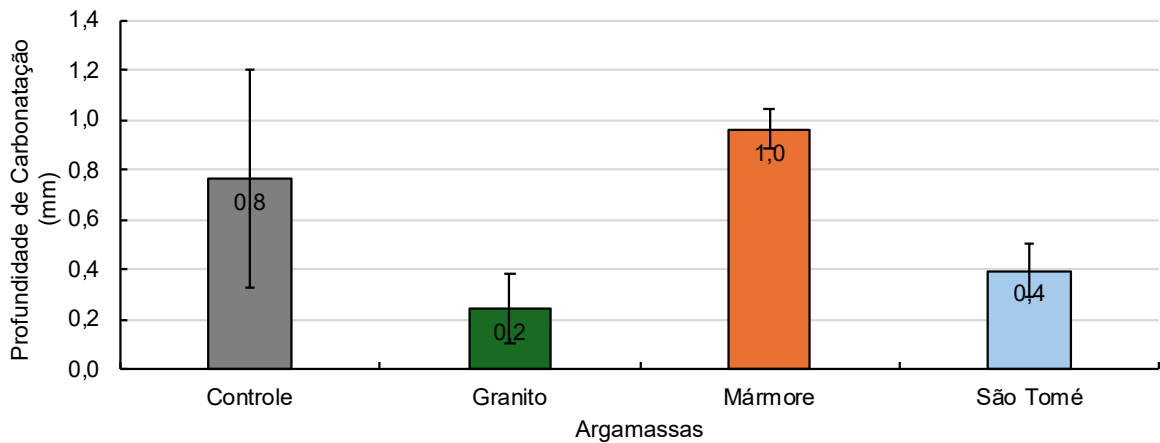
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 30 – Ampliação de uma das imagens dos corpos de prova Controle com carbonatação interna



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 31 – Profundidade de carbonatação registrada por material



Fonte: Elaborado pela autora.

Em uma perspectiva ampla, todas as amostras estudadas apresentaram resultados na profundidade da carbonatação muito inferiores ao valor de cobrimento mínimo (20 mm) estabelecido pela norma NBR 6118 (ABNT, 2014) para classe de agressividade I. A NBR 6118 (ABNT, 2014) estabelece valores de cobrimento maiores para classes de agressividade maiores, isto se dá para possibilitar maior durabilidade das estruturas de concreto armado sob atuação de agentes agressivos. Para o resultado de carbonatação encontrado, é possível dizer que, para os mesmos 11 anos analisados, o compósito estudado atenderia a classe de agressividade III. Partindo de uma perspectiva de linearidade de carbonatação em função do tempo, o compósito proposto levaria 220 anos para atingir o cobrimento de 20mm. Neste sentido, é possível dizer que as argamassas propostas com método de empacotamento adotado

possibilitariam a construção com cobrimentos menores para um mesmo parâmetro de durabilidade. Ou, com um mesmo cobrimento mínimo, suportar classes de agressividade ambientais maiores.

No ambiente altamente alcalino (rico em Hidróxido de Cálcio) da solução de poros do concreto não carbonatado, a armadura é protegida contra a corrosão. No entanto, esse Ca(OH)_2 não é consumido para gerar o concreto carbonatado (HORNBOSTEL *et al.*, 2013 *Apud* ALMADA, 2021) e a região fica menos alcalina e assim, pode aumentar a chance de corrosão do aço. Neste sentido, os resultados de profundidade de carbonatação obtidos apresentam-se favoráveis a durabilidade do compósito cimentício em questão, sendo o granito com o melhor resultado, seguido pela pedra São Tomé.

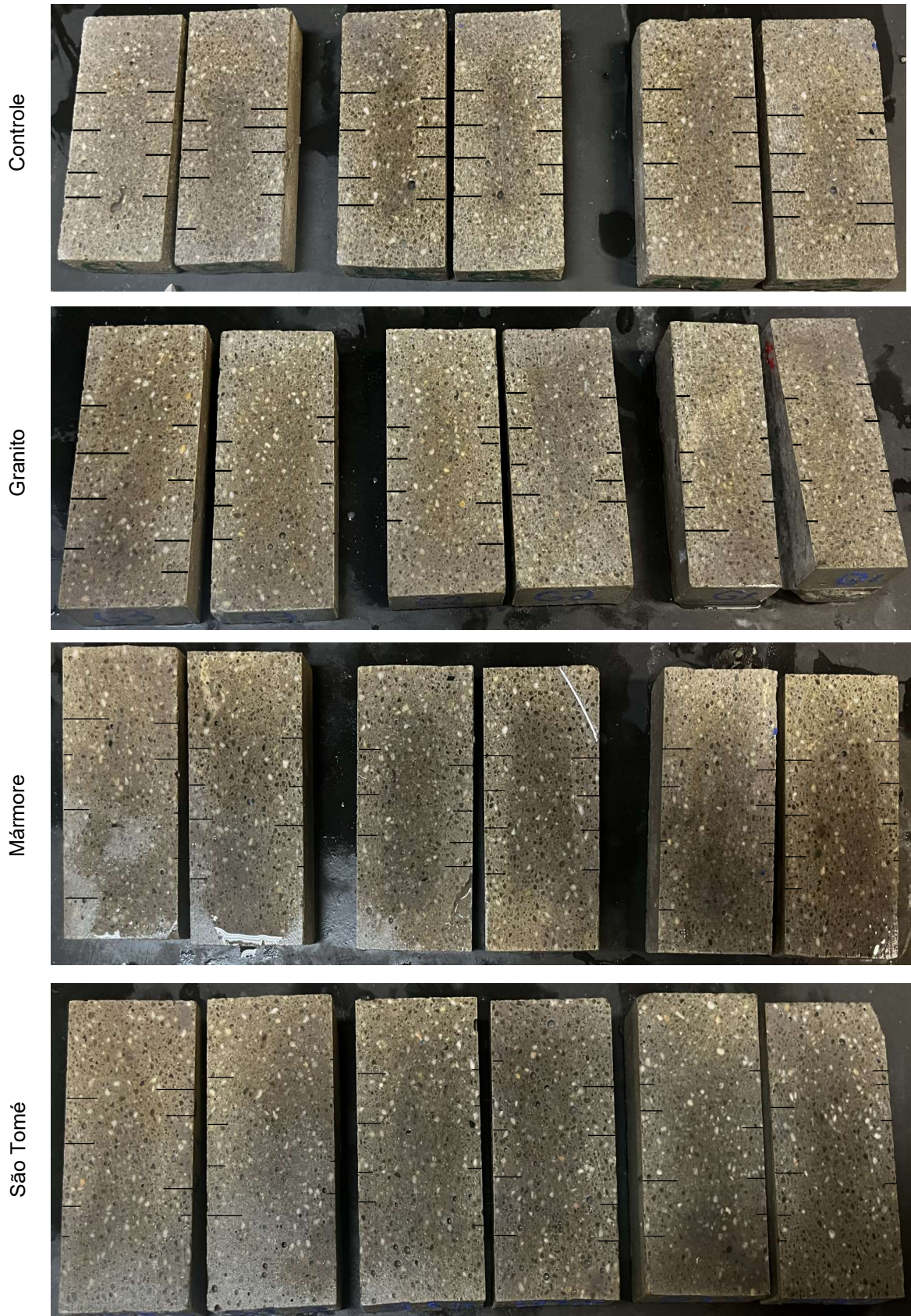
5.3.4. Penetração de cloretos

A Figura 32 apresenta as imagens registradas dos corpos de prova após a aspersão da solução de nitrato de prata e exposição a luz. As linhas pretas registradas nas imagens correspondem às medidas tomadas para mensuração da penetração de cloretos nos compósitos estudados. A Figura 33 apresenta o resultado da mensuração da profundidade de penetração de cloretos nas amostras com o resultado da média geral medida e sua extensão de registro.

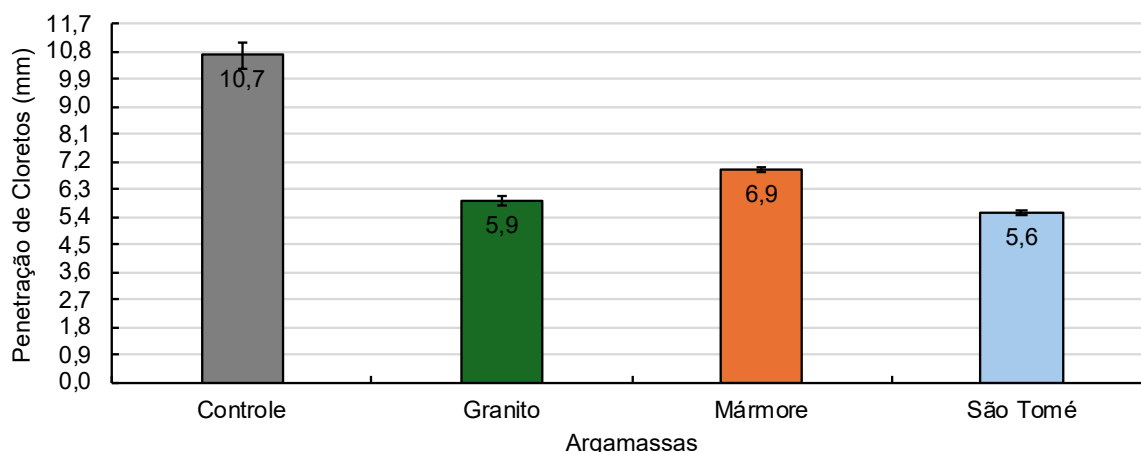
Para a análise da resistência à penetração de cloretos foi estabelecida a mesma quantidade de dias de ensaio da carbonatação e as medidas feitas na mesma escala para possibilitar uma análise comparativa destes dois parâmetros indicadores de durabilidade. Avaliar a resistência do compósito à penetração de cloretos é uma forma de entendimento da conectividade de poros do material e ser associada com a susceptibilidade ao ingresso de agentes agressivos (ALMADA, 2021).

Os mecanismos de transporte que levam ao movimento e concentração iônica dos cloretos no concreto são a absorção capilar, difusão iônica, permeabilidade sob pressão e mitigação iônica (CASCUDO, 1997). No ambiente altamente alcalino da solução porosa do concreto, o aço é protegido contra a corrosão por uma fina camada de óxidos de ferro (película passiva). No entanto, essa película passiva não é estável na presença de uma quantidade suficiente de cloretos ou quando o concreto ao redor do aço é carbonatado (HORNBOSTEL *et al.*, 2013).

Figura 32 – Imagem dos corpos de prova após aspersão de nitrato de prata e exposição a luz apresentando a indicação das medidas de penetração de cloretos efetuadas



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 33 – Resultado da mensuração de penetração de cloretos

Fonte: Elaborado pela autora.

A partir do resultado apresentado percebe-se que a profundidade de penetração de cloretos foi favorável para todas as amostras, inclusive a amostra controle, apresentando em todas medidas inferiores ao valor de cobrimento mínimo (20 mm) estabelecido pela norma NBR 6118 (ABNT, 2014) para classe de agressividade I. É notável que as argamassas com adição dos resíduos de rochas ornamentais apresentaram resultados absolutos melhores que a argamassa controle e o compósito com adição pedra São Tomé (resíduo ainda pouco estudado na literatura científica) e o com granito que apresentaram os melhores resultados, 47,7% e 44,9% menores, respectivamente. A argamassa com resíduo de mármore foi que caiu menos, 35,5% em relação ao controle.

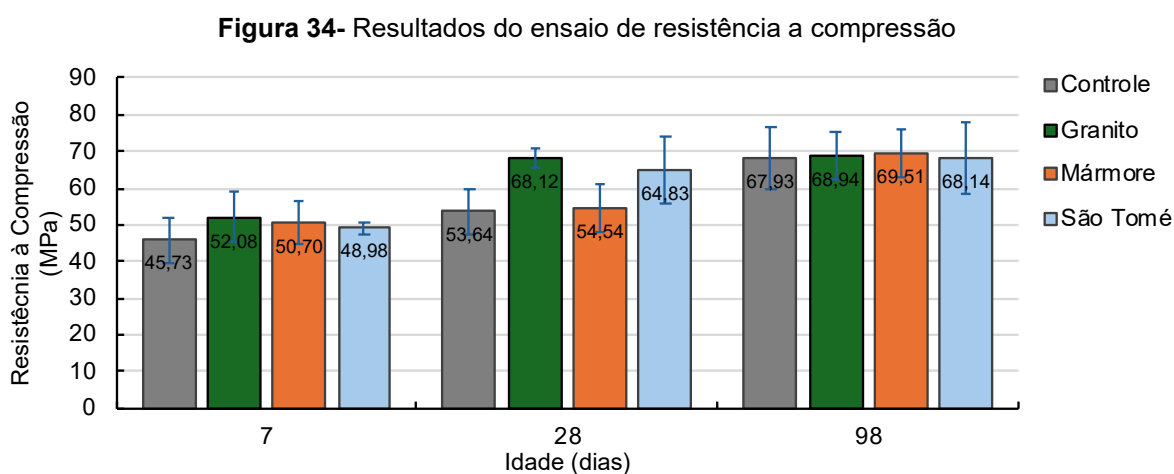
Os resultados obtidos neste ensaio corroboram os resultados das propriedades físicas (que são indicadores de durabilidade) como porosidade, absorção de água por imersão e capilaridade e as propriedades de durabilidade como a carbonatação.

O entendimento da morfologia das partículas aliada aos resultados de caracterização física obtidos permite o entendimento dos processos que culminam nos resultados das propriedades no estado endurecido. A morfologia menos porosa permite entender possíveis melhorias em resultados de absorção de água e porosidade dos compósitos. A densificação da matriz se faz importante para mitigar a penetração de agentes nocivos visto que, de acordo com Cascudo (1997), o transporte de cloretos, assim como outras substâncias dissolvidas, de líquidos e de gases no interior de um compósito cimentício, é decisivamente influenciado pela estrutura porosa da pasta de cimento endurecida. Neste sentido, a interconexão de poros (permeabilidade) e a distribuição do tamanho dos poros constituem fatores de

suma importância. Visto os mecanismos de transporte que geram patologias vinculadas ao ataque de cloretos, as melhorias encontradas nos resultados dos indicadores de durabilidade culminaram em bons resultados nesta propriedade de durabilidade dos compósitos estudados.

5.3.5. Resistência a Compressão

Na Figura 34 estão apresentados os resultados de resistência a compressão registrados para cada uma das argamassas propostas.



Fonte: Elaborado pela autora.

As argamassas com adição de resíduo obtiveram melhores resultados absolutos médios nos primeiros dias, superando a argamassa controle (13,89 % para granito, 10,88% para mármore e 7,10% pedra São Tomé superiores). Considerando os desvios padrões entende-se que os resultados são similares em todas as amostras. Aos 28 dias, em números absolutos, nota-se um ganho de resistência similar para as argamassas controle e com adição de resíduo mármore (aumento de 1,70%). Já os compósitos com adição de granito e pedra São Tomé apresentaram um aumento de resistência (27,01% e 20,88%, respectivamente). E chegou-se aos 98 dias com resistência à compressão de todos os compósitos iguais (aumentos ínfimos, em números absolutos, de 0,31 a 2,34%).

A argamassa de controle apresentou um comportamento mais discreto ao longo da idade. Constatou-se um aumento de 17,29% entre 7 e 28 dias e de 26,64% entre 28 e 98 dias. Um pouco similar a argamassa com mármore que teve aumento de 7,58% até 28 dias e 27,44% nas idades maiores (98 dias), chegando ao maior valor entre as argamassas testadas. Já as argamassas com resíduo de granito e pedra São

Tomé apresentaram comportamento similar ao longo do tempo, tendo um ganho maior inicial (7 e 28 dias) de resistência à compressão (30,80% e 32,37%, respectivamente), convergindo para uma estabilização a partir desta idade com um ganho diminuto aos 98 dias (1,20% e 5,10, respectivamente).

Essas variações nos ganhos de resistência mecânica entre as amostras de granito e São Tomé em relação a de mármore e a controle podem estar relacionadas com a hidratação do cimento e a formação do gel de CSH ao longo do tempo em função da granulometria e ASE das partículas (Tabela 6). Sendo este um dos principais responsáveis pela resistência mecânica nos compósitos cimentícios. Possivelmente, a dureza dos minerais presentes no granito e São Tomé tiveram maior atuação inicialmente visto que o cimento ainda não havia atingido suas resistências finais. E, ao longo do tempo de cura, se equipararam.

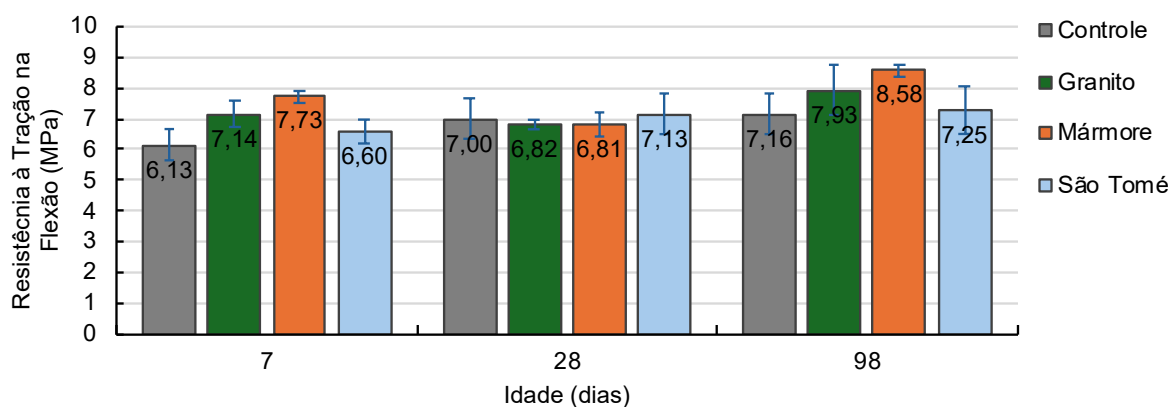
A aplicação do resíduo como adição promove melhor empacotamento das partículas, contribuindo positivamente para a maioria das propriedades (ALMADA *et al.*, 2022). De acordo com Almada (2021), a influência das adições não reativas nas resistências mecânicas dos compósitos está relacionada a efeitos físicos, como empacotamento das partículas (preenchimento de vazios), interação entre a matriz cimentícia e o agregado (aderência), influencia na formação dos compostos hidratados (nucleação) e ao fator água/cimento efetivo. Neste sentido, observa-se que os resultados finais de resistência mecânica à compressão aos 98 dias equiparados entre as amostras corroboram aos resultados das propriedades físicas registrados na neste trabalho.

Para a produção de 1 m³ de argamassa, as adições promoveram uma redução no volume de cimento e sem perdas de resistências mecânicas a compressão. Neste sentido, as argamassas propostas (conforme registrado na Tabela 11) apresentam uma redução no consumo de cimento e areia de 6,89% nas argamassas com adição de granito, 7,14% para pedra São Tomé e 7,26% para mármore. Além das argamassas com adição de resíduos apresentaram melhores desempenhos em indicadores de durabilidade. Destaca-se que esta redução do consumo de cimento tende a reduzir o impacto ambiental destes compósitos, associado a redução da extração de materiais primas não renováveis (calcário, sílica, areias, entre outros) e pela redução do volume resíduos de rochas ornamentais descartados no ambiente.

5.3.6. Resistência à tração na flexão

Na Figura 35 são apresentados os resultados de resistência à tração na flexão. Diferentemente da resistência a compressão, tem-se que a argamassa com resíduo de mármore apresentou melhores performances em idades avançadas e em 7 dias de cura. Isto pode ter ocorrido pelas características morfológicas de suas partículas. A maior rugosidade (por consequência maior ASE) e porosidade das partículas (Figura 20) podem ter gerado maior atrito entre elas o que corrobora o aumento da resistência à tração na flexão.

Figura 35- Resultados do ensaio de resistência à tração na flexão



Fonte: Elaborado pela autora.

Nas primeiras idades todos os compósitos com adição de MGSR apresentaram melhores resultados, sendo identificado um aumento de 16,45% na argamassa com granito, 26,10% com mármore e de 7,74% com pedra São Tomé. Já aos 28 dias suas resistências se equipararam (redução de granito e mármore de 2,49% e 2,66%, respectivamente e aumento de 1,89% da argamassa com pedra São Tomé). Aos 98 dias o compósito controle e a pedra São Tomé se mantiveram praticamente estáveis (aumento da segunda de 1,22%). Todavia as argamassas com adição de granito apresentaram um aumento de 10,76% e o mármore aumentou 19,88% em sua resistência a tração na flexão.

Este resultado pode estar relacionado com a correlação entre ASE e a rugosidade dos resíduos em relação a matriz cimentícia. A ASE e rugosidade maiores podem gerar maior área de contato entre a matriz e as partículas do resíduo gerando maior área de ancoramento para a resistência à tração na flexão.

Ao analisar a resistência à tração na flexão ao longo do tempo percebe-se uma performance superior das argamassas com resíduo em relação a argamassa controle. Destaca-se, contudo que as argamassas com Granito e Mármore apresentaram redução de 4,41% e de 11,89% entre 7 e 28 dias. Todavia se recuperam e apresentam um aumento de 11,08% e de 11,02% entre 28 e 98 dias, chegando aos maiores resultados entre as argamassas testadas. O controle teve aumento de 14,15% entre 7 e 28 dias, contudo não apresentou maiores ganhos em idades superiores, similar a argamassa com Pedra São Tomé com aumento de 7,69% entre 7 e 28 dias e 1,63% entre 28 e 98 dias.

Por fim, os resultados de resistência tração na flexão demonstram que todos os compósitos com adição de resíduos apresentaram melhores resultados que o controle ao final dos 98 dias, sendo o mármore com maior destaque, acredita-se que a morfologia das partículas tenha contribuído para uma melhor ancoragem. Além de melhorias técnicas, a adição do resíduo pode auxiliar na busca por materiais ecoeficientes (ALMADA *et al.*, 2022).

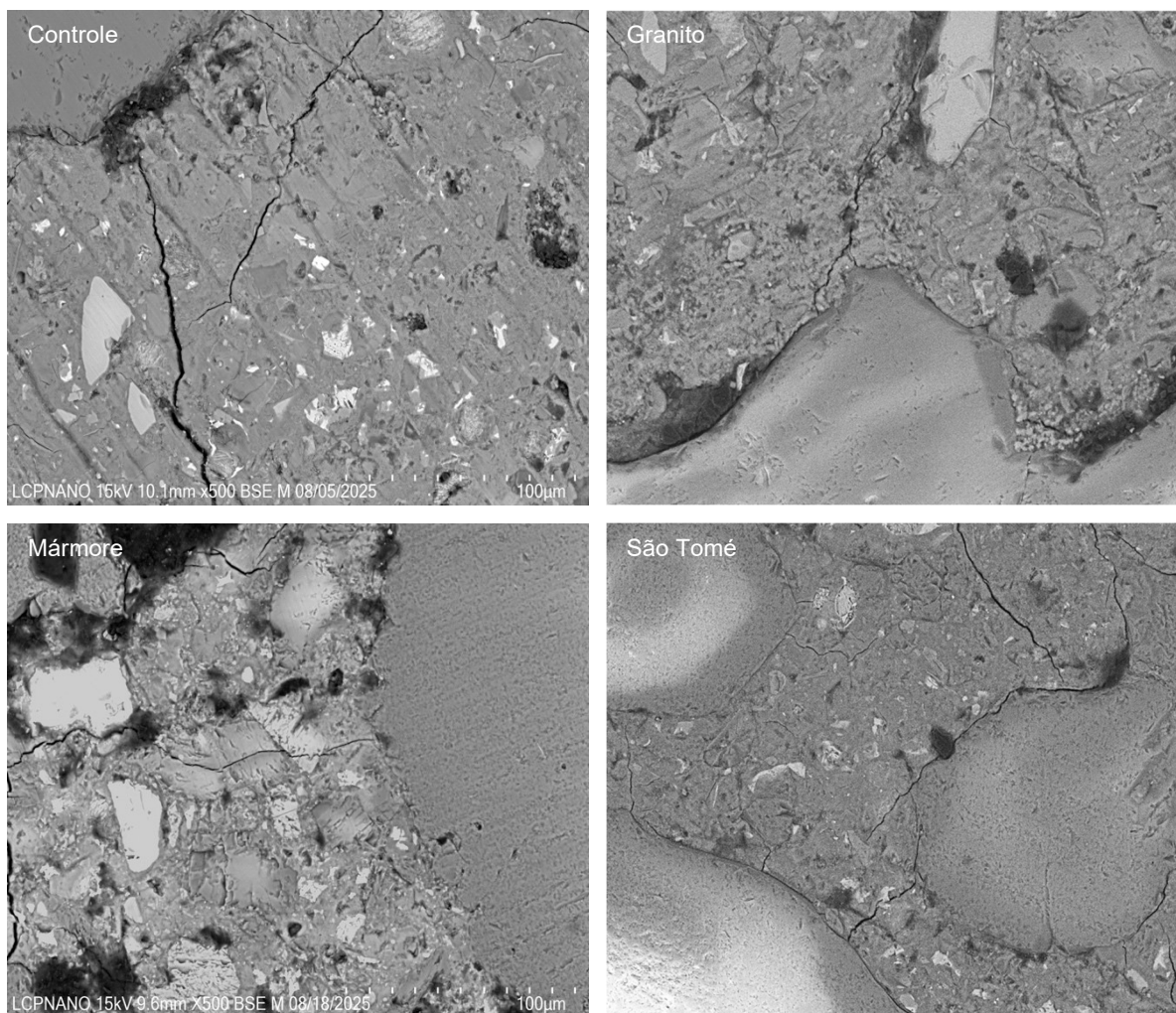
5.3.7. Microestrutura

Na Figura 36 são apresentadas as imagens de MEV de elétrons retroespalhados das argamassas propostas. Estas imagens possibilitam uma avaliação qualitativa das argamassas avaliadas. Nas imagens de MEV apresentadas na Figura 36 é possível observar uma boa distribuição e incorporação dos resíduos na matriz. Em relação aos poros de maiores diâmetros e preenchimento de vazios, observa-se pouca presença de vazios e os poros de maiores diâmetros que seriam mais evidentes estão mitigados.

A Zona de Transição Interfacial (ZTI) entre a pasta de cimento e os agregados é a interface mais importante do concreto, pois suas propriedades físicas e mecânicas são bem diferentes das da matriz (ALMADA, 2021). Neste sentido, notam-se ZTI com aspectos visuais com razoável densificação, pouca porosidade e, aparentemente, boa compactação. Quando se incorporam partículas de dimensões da ordem de micrômetros às misturas cimentícias, estas funcionam como sítios de nucleação que favorecem a hidratação do cimento, podendo otimizar as propriedades na zona de transição (ALMADA, 2021).

Nas Figuras de 37 a 39 são apresentados os mapeamentos EDS das imagens de MEV realizadas das amostras com adição de resíduos.

Figura 36- MEV das amostras de argamassas (ampliação 500x)

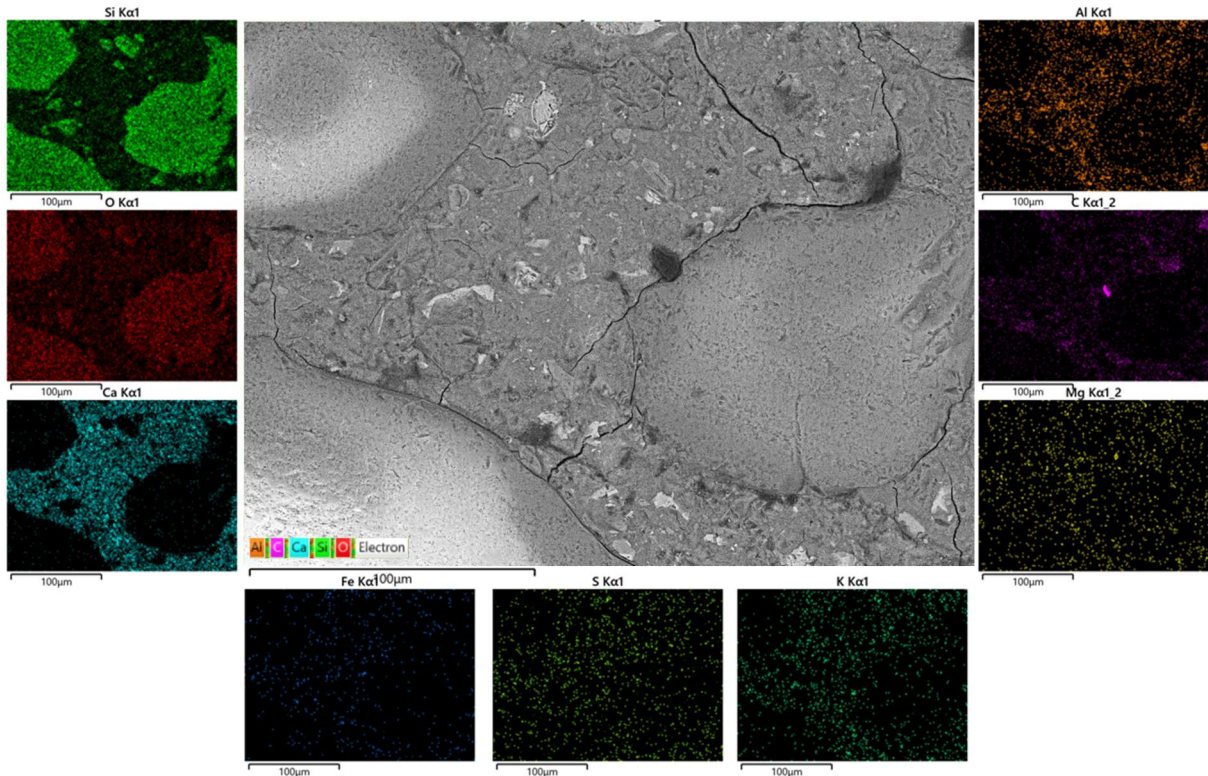


Fonte: Elaborado pela autora.

Como esperado é identificado menores concentrações de minerais do tipo C e Mg no granito e São Tomé, enquanto no mármore corresponde ao Si. Minerais específicos de cada tipo de adição interfere em sua composição. Pode-se considerar que a composição química na zona de transição (ZTI) é muito variável, enquanto no agregado e na região densa da matriz é relativamente estável, comparativamente (ALMADA, 2021). O agregado é rico em Si, a matriz é rica em Ca e o final da ZTI apresenta o ponto aproximado de estabilização de valores de ambos os compostos (ALMADA, 2021). Neste sentido, a Figura 40 apresenta o EDS em linha em cada uma das amostras para visualização aproximada da interface matriz agregado na ZTI.

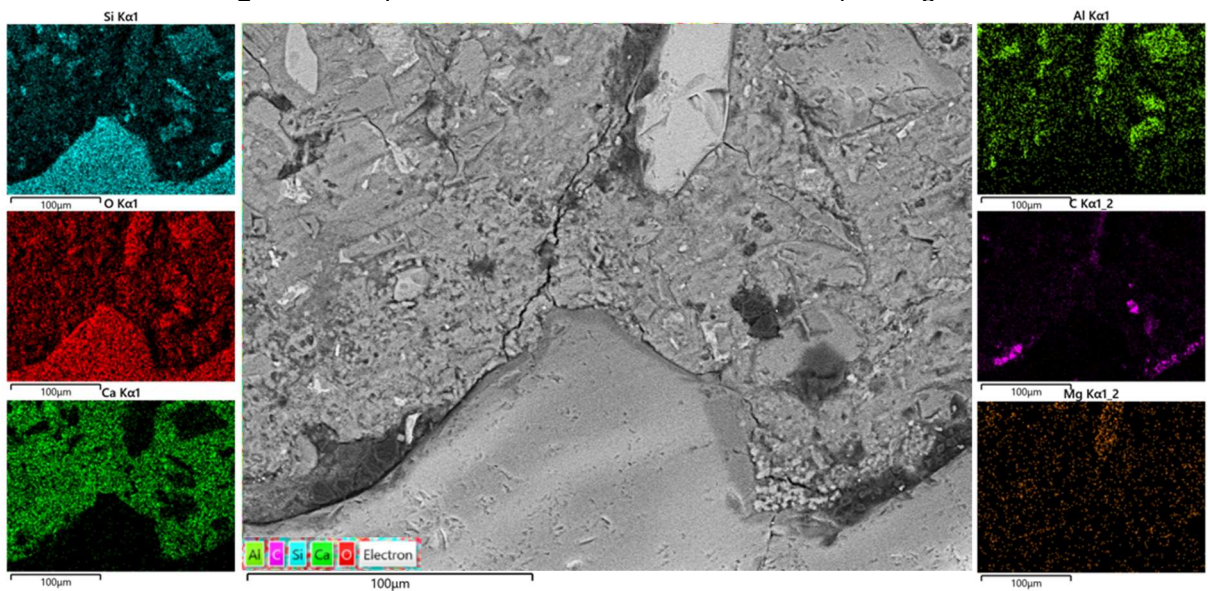
Através da variação do teor de cálcio e silício de uma região contendo agregado e matriz cimentícia consegue-se estimar a espessura da zona de transição.

Figura 37- Mapeamento EDS das amostras com adição de pedra São Tomé



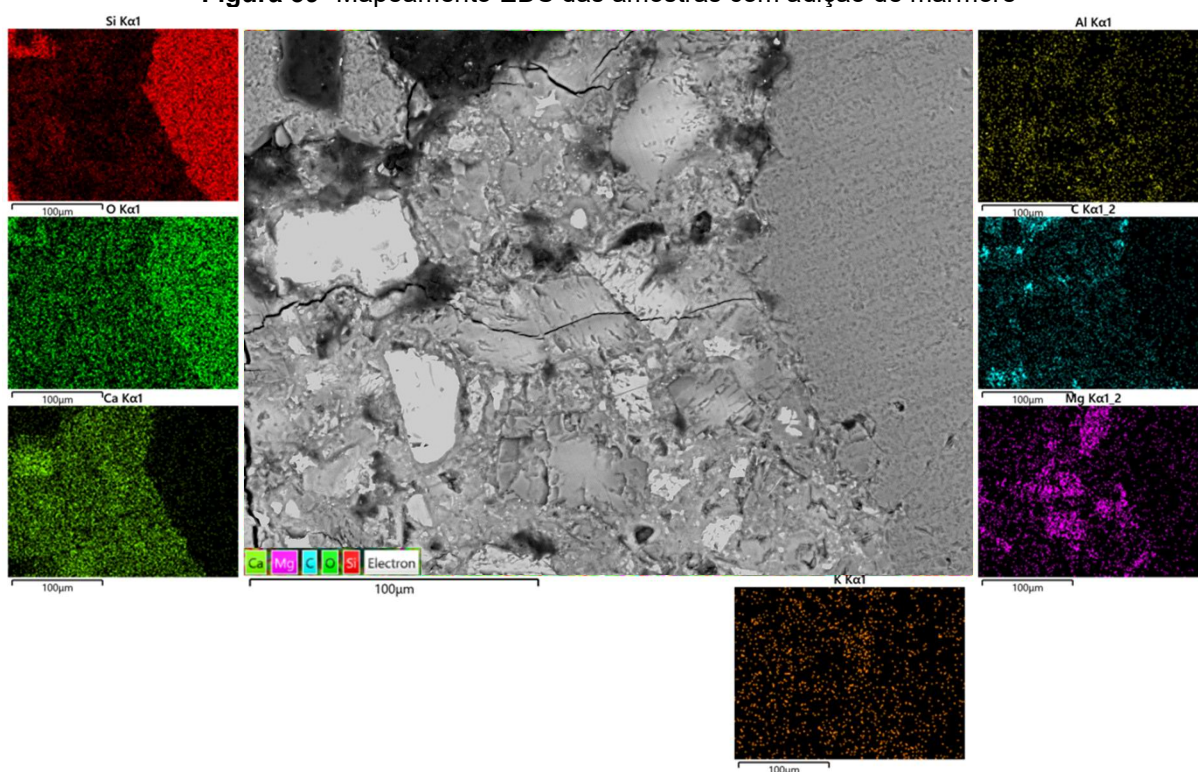
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 38- Mapeamento EDS das amostras com adição de granito



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 39- Mapeamento EDS das amostras com adição de mármore



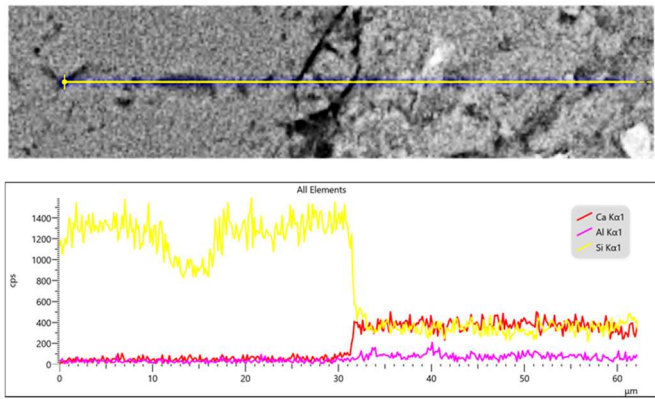
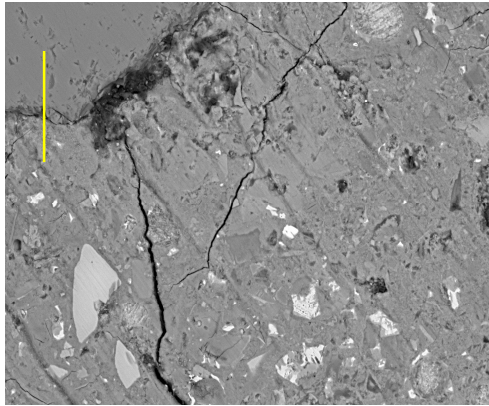
Fonte: Elaborado pela autora.

De acordo com os resultados, a amostra de controle apresentou espessura aproximada da ZTI de 4 μm , a amostra de granito de aproximadamente 20 μm , a com adição de mármore 4 μm e a de pedra São Tomé 5 μm . Na Literatura Científica é registrado que esta região tem correlação com as resistências mecânicas dos compósitos cimentícios (SCRIVENER *et al.*, 2004). Porém, afirmar esta correlação direta com precisão é difícil.

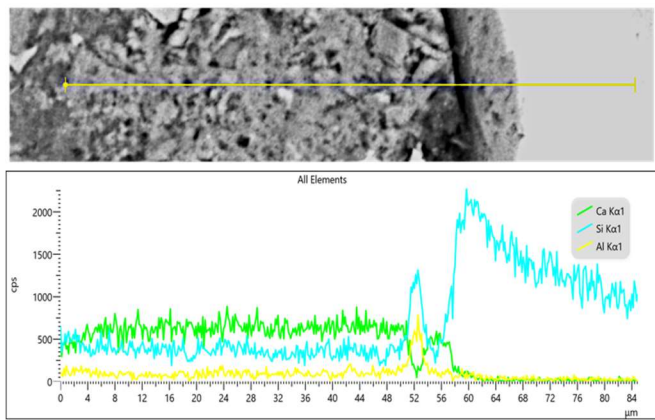
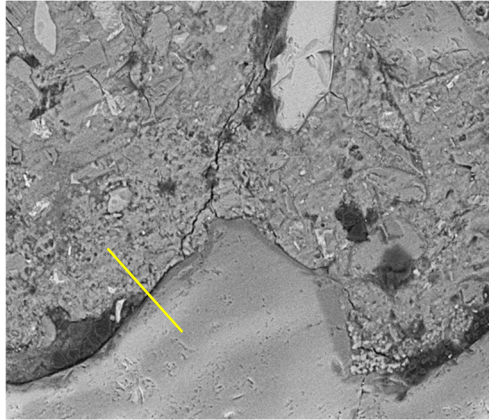
A microestrutura na ZTI apresenta características físicas e mecânicas diferentes das encontradas na matriz, como por exemplo, maior quantidade e maior tamanho dos cristais de CH e de etringita, orientação preferencial dos cristais de CH e a maior porosidade da interface (SCRIVENER & PRATT, 1984 *apud* ALMADA, 2021). Assim, os resultados de imagem obtidos na microscopia através dos EDS executados, mostram diferenciações dos minerais presentes nas amostras corroborando os resultados anteriormente registrados. Através das microscopias adotadas não é possível identificar melhorias na microestrutura em função dos diferentes resíduos adotados. Contudo, evidenciam o refinamento da ZTI em todas as argamassas em função do método de empacotamento adotado na dosagem.

Figura 40- EDS em linha das argamassas

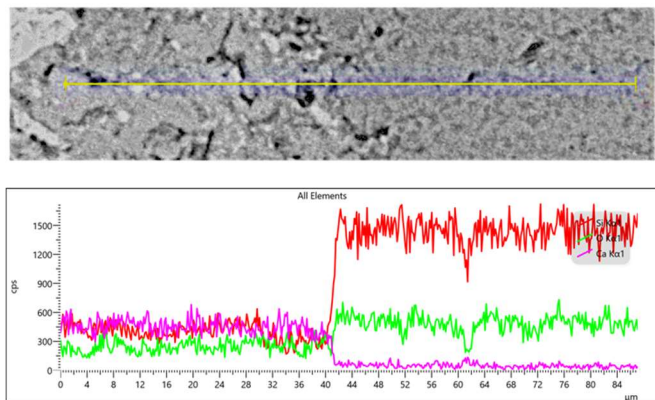
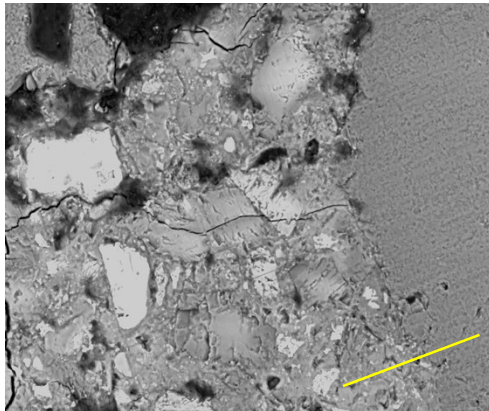
Controle



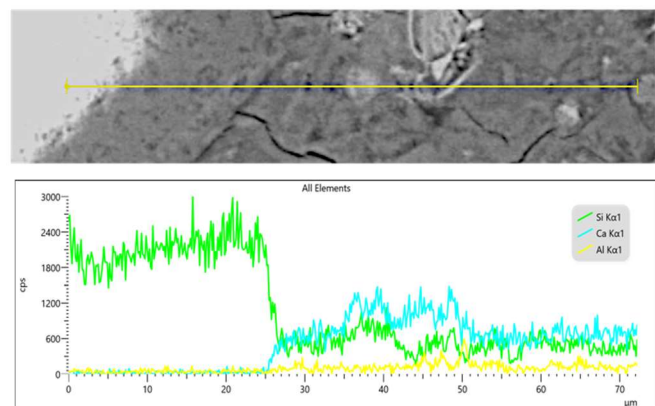
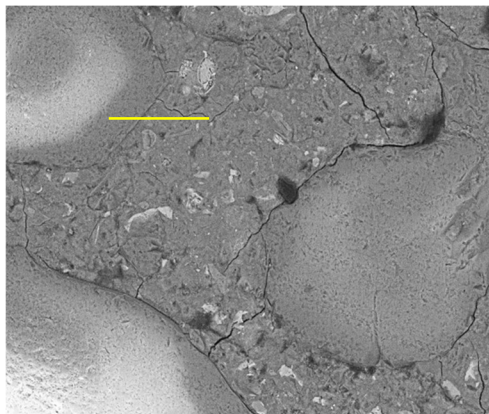
Granito



Mármore



São Tomé



Fonte: Elaborado pela autora.

6 CONCLUSÕES

A utilização de resíduos de rochas ornamentais, especificamente mármore, granito e pedra São Tomé, quando aplicados como adição mineral em argamassas estruturais proporcionam melhorias nos compósitos cimentícios. Em especial, melhorias nas propriedades físicas e de durabilidade. A natureza dos resíduos e sua aplicação como adição apresentam pouca influência relacionada às resistências mecânicas.

O método de dosagem adotado através do empacotamento de partículas, permitiu a produção de compósitos cimentícios eficientes em que, a partir da adição de resíduos de rochas ornamentais foi possível produzir compósitos com manutenção e/ou melhorias das propriedades analisadas. Destaca-se ainda a possibilidade de inserção de 40% de resíduo de rocha ornamental e redução do consumo de cimento e demais materiais, diminuindo o impacto ambiental. A utilização dos resíduos como adição mineral foi crucial no melhor empacotamento da matriz através do efeito filer.

Esta redução é uma forma de minimizar os problemas ambientais também provenientes da cadeia produtiva do cimento e da extração da areia. Vale ressaltar que a redução proporcional por volume de compósito no consumo de cimento e areia possivelmente também gera redução financeira na produção da argamassa, visto que para o mesmo volume de argamassa será consumido menos insumos pagos e inseridos insumos provenientes de resíduos.

Em relação aos resultados técnicos obtidos neste estudo, a utilização de resíduos de rochas ornamentais como adição mineral nas argamassas estruturais promoveu melhorias, em números absolutos, em todos os aspectos avaliados. Considerando os desvios padrões notam-se equiparações ou melhorias, com destaque para as propriedades físicas e de durabilidade. Em todos os aspectos avaliados correspondentes aos índices físicos, quando tratada em números absolutos, as amostras com adição de resíduo apresentaram reduções. Estes resultados estão correlacionados à redução da porosidade e a interrupção da interconexão dos poros pelo método do empacotamento adotado e o efeito filer.

O índice de porosidade aberta registrado apresentou uma redução para os compósitos com adição de resíduo sendo São Tomé, uma redução em relação a controle de 29,7%, o mármore de 28% e o granito de 21,2%. Isso culminou em resultados melhorados para capilaridade, absorção de água por capilaridade e

absorção de água por imersão. A capilaridade foi reduzida em 37% nos compósitos com adição de resíduo pedra São Tomé, 22,7% com mármore e 8,5% com granito. Nos índices de absorção de água por imersão a pedra São Tomé apresentou uma redução de 31% em relação a amostra controle, o mármore aproximadamente 30% e granito de 22%. Vale ressaltar que a amostra controle também apresentou desvio padrão expressivamente maior que em todas as amostras com adição de MGSR. Nota-se que de maneira geral a adição dos resíduos promoveu melhorias ou não gerou perdas nas propriedades. O desempenho das argamassas com resíduos de pedra São Tomé, quando avaliada em números absolutos, apresentou os melhores resultados e esta rocha ainda está pouco explorada na Literatura Científica.

Em relação a profundidade de carbonatação, todos os compósitos apresentaram excelentes resultados, registrando apenas milímetros de penetração. Para 68 dias de carbonatação acelerada, correspondendo a aproximadamente 11 anos de exposição natural, a argamassa estrutural com resíduo de granito apresentou uma profundidade de 0,2mm, a pedra São Tomé 0,4mm e o mármore 1mm, sendo o mármore um pouco superior ao controle que apresentou 0,8mm. Apesar disso, os resultados, mesmo do mármore sendo superior ao controle, são expressivamente positivos, visto que para que a carbonatação desta argamassa com resíduo de mármore ultrapasse a profundidade do revestimento exigida pelas normas técnicas brasileiras, 20mm, estimam-se 220 anos de exposição.

Em relação a penetração de cloretos os resultados foram melhores para as argamassas com resíduo em relação ao controle. A argamassa com resíduo de mármore apresentou desempenho 35,5% melhor que o controle, a com granito 44,9% melhor e São Tomé 47,7% de melhoria em relação ao controle. Nestes dois ensaios foram estabelecidos o mesmo período para comparação cruzada e os compósitos apresentaram bons resultados para os dois ensaios. Não foram evidenciadas correlações direta de resultados entre a carbonatação e o ataque de cloretos.

Do ponto de vista das resistências mecânicas, os resultados finais obtidos para a resistência a compressão, após 98 dias de cura, ficaram praticamente todos equiparados ao controle, mas, ainda assim, ligeiramente melhor. Foram conseguidos compósitos cimentícios de alta resistência à compressão próximos aos 70 MPa. Em relação a resistência a tração na flexão os resíduos apresentaram resultados sutilmente melhores em relação a amostra controle aos 7 dias. Contudo, todos os

resíduos apresentaram resultados levemente superiores a amostra controle devido ao efeito filler e melhor ancoragem da matriz.

Os resultados de penetração de cloretos e carbonatação não se refletem nas resistências mecânicas, acredita-se pelo fato do tipo, morfologia e distribuição dos poros. O método de empacotamento adotado, aliado às características morfológicas e físicas das partículas dos resíduos geraram preenchimento dos poros menores. Contudo, os poros maiores, visíveis a olho nu nas amostras (como evidenciado nas imagens dos CP's usados nos ensaios de ataque de cloretos e carbonatação) não foram preenchidos. Este tipo de poro apresenta relevância nas resistências mecânicas. A existência deste tipo de poro pode estar vinculada ao procedimento de moldagem adotado ou alguma reação com o aditivo utilizado. Apesar disso, não houve perdas nas resistências mecânicas. Os resultados dos EDS lineares demonstram zonas de transição pequenas corroborando resultados de resistência mecânicas obtidos.

Este estudo promove uma contribuição na mitigação dos problemas ambientais causados pelo descarte dos resíduos de rochas ornamentais ao mesmo tempo em que propõe compósitos cimentícios com melhor desempenho que os convencionais, principalmente nos quesitos relacionados à durabilidade. Vale ressaltar que os resíduos utilizados são *in natura*, passando apenas por processo de secagem e destorroamento manual. Isso mitiga perdas da perspectiva da pegada de carbono, visto que não foi necessário qualquer cominuição dos resíduos. A análise comparativa entre os tipos de resíduos de rochas ornamentais não evidenciou grandes diferenças de performance entre os compósitos com adição mineral de rochas de diferentes origens. Contudo, a argamassa com a adição de resíduo proveniente da pedra São Tomé gerou melhorias nos resultados em capilaridade, e, considerando números absolutos, em quase todos os ensaios de propriedades de durabilidade. Desta forma, a utilização de resíduo de pedra São Tomé apresenta grande potencial para uso em argamassas estruturais e ainda é pouco explorada na literatura científica.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALIABDO, A. A. *et al.* Re-use of waste marble dust in the production of cement and concrete. **Construction and Building Materials**. v. 50, p. 28-41, 2014.

ALLAM, M. E. *et al.* Re-use of granite sludge in producing green concrete. **ARN Journal of Engineering and Applied Sciences**. v. 9, nº12 p. 2731-2737, Dez, 2014.

ALMADA, B. S. *et al.* Effect of the waste ornamental rocks on the hydration and life cycle of Portland cement composites. **Construction And Building Materials**. v. 395, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132353>.

ALMADA, B. S. *et al.* Influence of the heterogeneity of waste from wet processing of ornamental stones on the performance of Portland cement composites. **Construction And Building Materials**. v. 262, Jul, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120036>.

ALMADA, B. S.; SANTOS, W. J. Dos; SOUZA, S. R. Marble and granite waste as mineral addition in mortars with different water-cement ratios. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 22, n. 4, p. 7-22, out./dez. 2022. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212022000400624>.

ALYAMAÇ, K. E.; INCE R. A preliminary concrete mix design for SCC with marble powders. **Construction And Building Materials**. v. 23, p. 1201-1210, 2009. <https://doi:10.1016/j.conbuildmat.2008.08.012>

ALYAMAC, K. E.; GHAFARI E.; INCE R. Development of eco-efficient self-compacting concrete with waste marble powder using the response surface method. **Journal of Cleaner Production**. v. 144, p. 192-202, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.156>

APOLINÁRIO, E. C. A. **Influência da adição do resíduo proveniente do corte de mármore e granito (rcmg) nas propriedades de argamassas de cimento portland**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal da Bahia, 193 p., 2014.

ASHISH, D. K. Feasibility of waste marble powder in concrete as partial substitution of cement and sand amalgam for sustainable growth. **Journal of Building Engineering**. v. 15, p. 236-242, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2017.11.024>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS. ABIROCHAS. **Informe Abirochas - Balanço de exportações e importações de rochas ornamentais**. Disponível em: <https://abirochas.com.br/biblioteca/informes-abirochas/>, acessado em setembro de 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS. ABIROCHAS. **Tipologias das rochas ornamentais**. Disponível em: <https://abirochas.com.br/>, acessado em setembro de 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto — Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7214**: Areia normal para ensaio de cimento - Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecido – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11768**: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12142**: Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de provas prismáticos. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13278**: Argamassa para assentamento de paredes e tetos – Determinação da densidade da massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13281**: Argamassas inorgânicas – Requisitos e métodos de ensaios – Parte 1: Argamassas para revestimento de paredes e tetos. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13281**: Argamassas inorgânicas – Requisitos e métodos de ensaios – Parte 2: Argamassas para assentamento e argamassas para fixação de alvenaria. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

AZEVEDO, A. R. G. et al. Effect of Granite Waste Incorporation on the Behavior of Mortars. **MDPI Materials**. v. 12, 2019. [https:// doi:10.3390/ma12091449](https://doi.org/10.3390/ma12091449).

BACARJI, E. et al. Sustainability perspective of marble and granite wastes as concrete fillers. **Construction And Building Materials**. v. 45, p. 1-10, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.032>.

BARBOSA, M. T. G. et al. High quality of mortar with marble waste aggregate. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 18, n. 2, p. 387-399, abr./jun. 2018. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212018000200260>.

BENJEDDOU, O. et al. Valorization of Powder Obtained from Marble Sludge Waste and Its Suitability as a Mineral Filler. **MDPI Crystals**. v. 11, 2021. <https://doi.org/10.3390/cryst11060619>.

BOADELLA, I. L. et al. The Influence of Granite Cutting Waste on The Properties of Ultra-High Performance Concrete. **MDPI Materials**. v. 12, 2019. <https://doi.org/10.3390/ma12040634>.

BRAGA, F. C. S. et al. Feasibility evaluation of the use of mud waste from marble shop as soil remineralizer. **Geologia USP**. Série Científica, v. 23, n. 4, p. 37-47, 2023. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v23-209715>.

BUYUKSAGIS, I.S., UYGUNOGLU, T. and TATAR, E. Investigation on the usage of waste marble powder in cement-based adhesive mortar. **Construction And Building Materials**, 1V. 54, p. 734–742, 2017.

CASCUDO, O. **Controle da corrosão de armaduras em concreto** – Inspeção e Técnicas eletroquímicas. São Paulo: Pini, 1997.

CASTRO, A. L. DE; PANDOLFELLI, V. C. Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica**, v. 55, n. 1, p. 18–32, 2009.

CHEN, J. J. et al. Adding granite polishing waste as sand replacement to improve packing density, rheology, strength and impermeability of mortar. **Powder Technology**. v. 364, p. 404-415, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.02.012>.

CORINALDESI, V. et al. Characterization of marble powder for its use in mortar and concrete. **Construction And Building Materials**. v. 24, p. 113-117, 2010. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.08.013>.

DAFICO, D. A. Estudo da dosagem do concreto de alto desempenho utilizando pozolana provenientes da casaca de arroz. **Tese** (Doutorado), Universidade Federal de Santa Catarina, 2001.

DAL MOLIN, Denise Carpena Coutinho. Adições Mineraias. Capítulo 08. Seção II Materiais. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. G.C. Isaia. 1. Ed. São Paulo, IBRACON, 2011.

DANISH, P. et al. Study on influence of Metakaolin and waste marble powder on self-compacting concrete – A state of the art review. **Materials Today: Proceedings**. v. 44, p. 1428-1436, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.629>

DOBISZEWSKA, M. et al. Influence of Rock Dust Additives as Fine Aggregate Replacement on Properties of Cement Composites—A Review. **MDPI Materials**. v. 15, 2022. <https://doi.org/10.3390/ma15082947>.

DOBISZEWSKA, M. et al. Investigating the Influence of Waste Basalt Powder on Selected Properties of Cement Paste and Mortar. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. v. 245, 2017. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/245/2/022027>.

ELYAMANY, H. et al. Effect of filler types on physical, mechanical and microstructure of self compacting concrete and Flow-able concrete. **Alexandria Engineering Journal**. v. 53, p. 295-307, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aej.2014.03.010>.

EVRAM, A. et al. Effects of waste electronic plastic and marble dust on hardened properties of high strength concrete. **Construction And Building Materials**. v. 263, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120928>.

FORDHAM, C. J.; SMALLEY, I. J. A simple thermogravimetric study of hydrated cement. **Cement and Concrete Research**, v. 15, p. 141-144, 1985.

FOSSEN, H. **Structural Geology**. Cambridge: Cambridge University Press, 2016.

GADO R. A., The feasibility of recycling marble & granite sludge in the polymer-modified cementitious mortars Part A- In polymer-modified cementitious adhesive mortar. **Process Safety and Environmental Protection**. v. 159, p. 978-991, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.01.059>.

GENCEL, O. et al. The use of waste marble for cleaner production of structural concrete: A comprehensive experimental study. **Construction And Building Materials**. v. 361, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129612>.

GUPTA, L. K. et al. Impact on mechanical properties of cement sand mortar containing waste granite powder. **Construction And Building Materials**. v. 191, p.155-164, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.203>.

HORNBOSTEL, K.; LARSEN, C. K.; GEIKER, M. R. Relationship between concrete resistivity and corrosion rate – A literature review, **Cement and Concrete Composites**, v. 39, p. 60-72, 2013.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - **ISO 1920-12**: Testing of concrete - Part 12: Determination of the carbonation resistance of concrete - Accelerated carbonation method, 2015.

JAIN, A. et al. Effect of granite industry waste addition on durability properties of fly ash blended self-compacting concrete. **Construction And Building Materials**. v. 340, p.127727, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127727>.

KABEER, K. I.S.A. et al. Utilization of marble powder as fine aggregate in mortar mixes. **Construction And Building Materials**. v. 165, p. 321-332, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.061>.

KARIMIPOUR, A. et al. A thorough study on the effect of red mud, granite, limestone and marble slurry powder on the strengths of steel fibres-reinforced self-consolidation concrete: Experimental and numerical prediction. **Journal of Building Engineering**. v. 44, p. 103398, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.103398>.

KARMEGAM, A. et al. Utilization of granite sawing waste in self compacting concrete. **Građevinar** . v. 66, p. 997-1006, 2014. [https:// DOI: 10.14256/JCE.1117.2014](https://doi.org/10.14256/JCE.1117.2014).

KASHYAP, V.S. et al. FTIR Analysis of Nanomodified Cement Concrete Incorporating Nano Silica and Waste Marble Dust. **Earth and Environmental Science**. v. 796, p. 012022, 2021. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/796/1/012022>.

KUORIBO, E. et al. Utilisation of waste marble dust in concrete production: A scientometric review and future research directions. **Journal of Cleaner Production**. v. 374, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133872>.

KUMAR, V. et al. Strength and microstructure correlation of binary cement blends in presence of waste marble powder. **Materials Today: Proceedings**. v. 43, p. 857-862, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.073>.

LAYSSI, H. et al. Electrical resistivity of concrete. **Concrete International**, v. 37, n. 5, p. 41-46, 2015.

LI, L.G. et al. Recycling of marble dust as paste replacement for improving strength, microstructure and eco-friendliness of mortar. **Journal of Cleaner Production**. v. 210, p. 55-65, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.332>.

LI, L.G. et al. Use of marble dust as paste replacement for recycling waste and improving durability and dimensional stability of mortar. **Construction And Building Materials**. v. 166, p. 423-432, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.154>.

MARTINS, M.A. et al. Durability indicators of high-strength self-compacting concrete with marble and granite wastes and waste foundry exhaust sand using electrochemical tests. **Construction And Building Materials**. v. 317, p. 125907, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125907>.

MARTINS, M.A.B. et al. Behavior of high strength self-compacting concrete with marble/granite processing waste and waste foundry exhaust sand, subjected to chemical attacks. **Construction And Building Materials**. v. 323, p. 126492, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126492>.

MASHALY, A. O. et al. Effects of marble sludge incorporation on the properties of cement composites and concrete paving blocks. **Journal of Cleaner Production**. v. 112, p. 731-741, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.023>.

MEDINA, G. et al. Granite quarry waste as a future eco-efficient supplementary cementitious material (SCM): Scientific and technical considerations. **Journal of Cleaner Production**. v. 148, p. 467-476, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.048>.

MEERA, M. et al. Rheological and strength properties of self-compacting concrete incorporating marble and granite powders. **Materials Today: Proceedings**. v. 32, p. 1005-1013, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.531>.

MESSAOUDENE, I. et al. Strength development of ternary blended cement with marble powder and natural pozzolan. **Cement Wapno Beton**. n 1, p. 32-37, 2015.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto Microestrutura, Propriedades, e Materiais**, 4a ed. São Paulo: Pini, 2014.

MEYER, A. P.; ARTUR, A. C.; NAVARRO, F. C. Principais fatores petro-gráficos condicionantes da resistência ao ataque químico em rochas de revestimento. In: Simpósio de Rochas Ornamentais do Nordeste, 4., 16 a 19 de novembro de 2003, Fortaleza. *Anais - Fortaleza, CE*, 2003. p.153-164.

MHAMAL, A. A. et al. Use of marble and granite dust waste as partial replacement of fine aggregates in concrete. **Earth and Environmental Science**. v. 1130, p. 012013, 2023. <https://doi:10.1088/1755-1315/1130/1/012013>.

MITRE, S. H. M. **Contribuição ao estudo do comportamento de concretos produzidos com resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais tratado termicamente em relação aos aspectos mecânicos e de durabilidade**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Espírito Santo, 168 p., 2016.

MONTGOMERY, D. C; RUNGER, G. C. Estatística e probabilidade para engenheiros, 5a edição, Editora LTC, 2014.

MUNIR, J.M. et al. Efficiency of waste marble powder in controlling alkali–silica reaction of concrete: A sustainable approach. **Construction And Building Materials**. v. 154, p. 590-599, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.002>.

NASR, M. S. et al. Properties of eco-friendly cement mortar contained recycled materials from different sources. **Journal of Building Engineering**. v. 31, p. 101444, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101444>.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**; Trad. CREMONINI, R. A. 5. ed. São Paulo, Bookman, 2016.

OZKILIÇ, Y.O. et al. Optimum usage of waste marble powder to reduce use of cement toward eco-friendly concrete. **Journal of Materials Research and Technology (jmr&t)**. v. 25, p. 4799-4819, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.06.126>.

PALANISAMY, C. et al. Experimental investigation on self-compacting concrete with waste marble and granite as fine aggregate. **Materials Today: Proceedings**. v. 65, p. 1900-1907, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.05.159>.

PEREIRA, M.M.L. et al. Evaluation of use of marble and granite cutting waste to the production of self-compacting concrete. **Construction And Building Materials**. v. 345, p. 128261, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128261>.

PROKOPSKI, G. et al. The effect of using granite dust as a component of concrete mixture. **Case Studies in Construction Materials**. v. 13, p. e00349, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00349>.

RILEM - Réunion Internationale des Laboratoires D'essais Et De Recherches Sur Les Matériaux Et Les Constructions. CPC-18: Measurement of hardened concrete carbonation depth. **Materials and Structures**, s. n., p.453-55, 1988.

RODRIGUES, R. et al. Mechanical properties of structural concrete containing very fine aggregates from marble cutting sludge. **Construction And Building Materials**. v. 77, p. 349-356, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.104>.

SADEK, D. M. et al. Reusing of marble and granite powders in self-compacting concrete for sustainable development. **Journal of Cleaner Production**. v. 121, p. 19-32, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.044>.

SANTOS, W. J. **Argamassa de alto desempenho**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Juiz de Fora, 209 p., 2011.

SARDINHA, M. et al. Durability properties of structural concrete containing very fine aggregates of marble sludge. **Construction And Building Materials**. v. 119, p. 45-52, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.071>.

SCRIVENER, K. L., Backscattered electron imaging of cementitious microstructures: understanding and quantification, **Cement and Concrete Composites**, v 26, p. 935-945, 2004.

SCRIVENER, K. L.; CRUMBIE, A. K.; LAUGESEN, P. The interfacial transition zone (ITZ) between cement paste and aggregate in concrete. **Interface Science**, v. 12, n. 4, p. 411–421, 2004.

SEGADÃES, A. M. et al. Using marble and granite rejects to enhance the processing of clay products. **Applied Clay Science**. v. 30, p. 42-52, 2005. <http://doi:10.1016/j.clay.2005.03.004>.

SEGHIR, N. T. et al. Effects of marble powder on the properties of the air-cured blended cement paste. **Journal of Cleaner Production**. v. 183, p. 858-868, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.267>.

SEGHIR, N. T. et al. The Effect of Curing Conditions on the Properties of Cement-Based Composites Blended with Waste Marble Dust. **JOM**. v. 71, n° 3, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11837-018-3254-9>.

SINDICROCHAS - <https://www.sindirochas.com/arquivos/atlas-rochas.pdf>

SINGH, M. et al. A study on environmental and economic impacts of using waste marble powder in concrete. **Journal of Building Engineering**. v. 13, p. 87-95, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2017.07.009>.

SINGH, M. et al. Long term strength and durability parameters of hardened concrete on partially replacing cement by dried waste marble powder slurry. **Construction And Building Materials**. v. 198, p. 553-569, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.005>.

SINGH, S. et al. Performance of granite cutting waste concrete under adverse exposure conditions. **Journal of Cleaner Production**. v. 127, p. 172-182, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.034>.

SINGH, S. et al. Performance of sustainable concrete containing granite cutting waste. **Journal of Cleaner Production**. v. 119, p. 86-98, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.008>.

SINGH, T. et al. Use of marble dust and linz-donawitz slag for the production of pervious concrete. **IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering**. v. 1289, p. 012075, 2023. <http://doi:10.1088/1757-899X/1289/1/012075>.

SHIRAZ, E. K. Reusing of stone waste in various industrial activities. Proceedings of the 2nd Int. Conf. Environ. Sci. and Dvlp. IPCBEE, vol. 4, IACSIT Press, Singapore, pp. 217–219, 2011.

SOARES, R. B. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos produzidos com a incorporação de resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais.** Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Espírito Santo, 163 p., 2014.

SONG, W. et al. Study of water absorption and corrosion resistance of the mortar with waste marble powder. **Construction And Building Materials.** v. 345, p. 128235, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128235>.

SOUSA, A. A. P. et al. CLASSIFICATION OF THE ORNAMENTAL STONES PROCESSING WASTE ACCORDING TO THE STANDARD NBR 10004/2004. **Journal of Urban and Environmental Engineering.** v. 16, n. 1, 2022. <https://doi.org/10.4090/juee.2022.v16n1.082088>.

SOUZA, L. G. M. et al. Composite utilizing wastes of marble and granite for building popular homes. **Journal of Building Engineering.** v. 9, p. 192-197, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobe.2017.01.003>.

SYARIF, M. et al. Reducing The Use Of Cement With Marble Waste For Seaside concrete construction through the Graphite carbon particles system. **ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences.** v. 18, nº 14, 2023.

TANGARAMVONG, S. et al. The influences of granite industry waste on concrete properties with different strength grades. **Case Studies in Construction Materials.** v. 15, p. e00669, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00669>.

TEIXEIRA, F. R. et al. Avaliação de propriedades relacionadas à penetração de cloretos em concretos produzidos com substituição parcial de cimento por resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais. **Revista Matéria.** v. 26, nº 03, e13029, 2021.

TOPÇU, I. B. et al. Effect of waste marble dust content as filler on properties of self-compacting concrete. **Construction And Building Materials.** v. 23, p.1947-1953, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.09.007>.

VALDEZ, P. et al. Uso de residuos de la industria del mármol como filler para la producción de hormigones autocompactantes. **Materiales de Construcción.** v. 61, 301, p.61-76, 2011. <https://doi.org/10.3989/mc.2010.55109>.

VARADHARAJAN, S. et al. Assessment of mechanical properties and environmental benefits of using rice husk ash and marble dust in concrete. **Structures.** v. 28, p.389-406, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.09.005>.

VIJAYALAKSHMI, M. et al. Strength and durability properties of concrete made with granite industry waste. **Construction And Building Materials.** v. 46, p.1-7, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.04.018>.

XI, Y. et al. Fresh and hardened properties of cement mortars using marble sludge fines and cement sludge fines. **Construction And Building Materials.** v. 220, p.142-148, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.153>.

YAMANEL, K. et al. Influence of waste marble powder as a replacement of cement on the properties of mortar. **Revista de la Construcción.** 18(2), 290–300, 2019. <https://doi.org/10.7764/RDLC.18.2.290>

APÊNDICES

APÊNDICE 1 – Tabela resumo da caracterização física dos MGRS da Literatura Científica.

Informações Gerais			Caracterização Física		
Fonte	Forma do Resíduo	Tipo do Resíduo	Massa específica γr (g/cm ³)	Graulometria (μm)	Área Superficial Específica (m ² /Kg)
Aliabdo, A.A. <i>et al.</i> , 2014	Lama	Mármore	2,50		3996 (Blaine)
Allam M. E. <i>et al.</i> , 2014	Lama	Granito	-	Passante peneira no. 300 e Passante peneira 4.76.mm	-
Almada <i>et al.</i> , 2023 - Amostra C1	Lama	Granito, Mármore, Quartzito, Ceramicas, Porcelanatos, Ardósia e Pedra São Tomé	2,75	D90 = 1,5μm D50=13,2μm D10=50μm	-
Almada <i>et al.</i> , 2023 - Amostra C2	Lama	Granito, Mármore, Quartzito, Ceramicas, Porcelanatos, Ardósia e Pedra São Tomé	2,69	D90 = 1,2μm D50=11,3μm D10=55,1μm	-
Almada <i>et al.</i> , 2023 - Amostra S1	Lama	Granito e Mármore	2,78	D90 = 1,6μm D50=10,3μm D10=41,4μm	-
Almada <i>et al.</i> , 2023 - Amostra S2	Lama	Granito e Mármore	2,79	D90 = 1,6μm D50=12μm D10=41,7μm	-
Almada <i>et al.</i> , 2023 - Amostra N1	Lama	Granito, Mármore, Porcelanato e Silestone	2,67	D90 = 1μm D50=9,9μm D10=45,6μm	-
Almada <i>et al.</i> , 2023 - Amostra N2	Lama	Granito, Mármore, Porcelanato e Silestone	2,70	D90 = 0,8μm D50=7,6μm D10=31,6μm	-
Alyamac <i>et al.</i> , 2017	Lama	Mármore	2,71	<125μm	392
Apolinário, E. C. A., 2014	Lama	Mármore e Granito	2,92	D50=12μm	3540 (BET)
Ashish, D.K., 2018	Pó (não especifica se provem da lama)	Mármore	2,21	-	332 (Blaine)
Azevedo, A.R.G. <i>et al.</i> , 2019	Lama	Granito	1,87	-	-
Bacarji, E. <i>et al.</i> , 2013 - Amostra A	Lama	Mármore e Granito	-	0,7 a 71	-
Bacarji, E. <i>et al.</i> , 2013 - Amostra B	Lama	Mármore e Granito	-	0,7 a 90	-
Bacarji, E. <i>et al.</i> , 2013 - Amostra C	Lama	Mármore e Granito	-	0,7 a 90	-
Barbosa <i>et al.</i> , 2018	Lama	Mármore	2,91	<4,8mm	2,58 (Figure Module)
Benjeddou, E. <i>et al.</i> , 2013	Lama	Mármore	2,65	65% entre 0 e 10μm	9350 (Blaine)

Fonte: Elaborado pela autora com base na bibliografia.

**APÊNDICE 2 – Tabela resumo da caracterização física dos MGR da Literatura Científica
(Continuação)**

Informações Gerais			Caracterização física		
Fonte	Forma do Resíduo	Tipo do Resíduo	Massa específica γr (g/cm³)	Gravimetria (μm)	Área Superficial Específica (m²/Kg)
Boadella, I.L. <i>et al.</i> , 2019	Lama	Granito	2,63	tamanho médio de partícula de 20 μm	-
Braga, F.C.S. <i>et al.</i> , 2023	Lama	Mármore, Granito, Gnaiss e Gabro	-	<0,074mm	-
Chen, J.J. <i>et al.</i> , 2020	Lama	Granito	2,77	0,071mm	-
Corinaldesi <i>et al.</i> , 2010	Lama	Mármore	2,55	D90 = 50μm D50=7μm	1500 (Método de Blaine)
Cruz, A.C.F., 2019	Lama	Mármore e Granito	-	Dmáx = 75μm	-
Danish, P. <i>et al.</i> , 2021 - Revisão	Lama	Mármore	2,12 a 2,71	-	8889 (Blaine) e 5100-5250 (modulo de finura)
Dobiszewska, M. <i>et al.</i> , 2022 - Revisão	Pó	Mármore			
Dobiszewska, M. <i>et al.</i> , 2022 - Revisão	Pó	Granito			
Dobiszewska, M. <i>et al.</i> , 2022 - Revisão	Pó	Basalto			
Elyamany, H.E. <i>et al.</i> , 2014	Pó	Mármore	-	Passante peneira No.200 (125 μm)	-
Elyamany, H.E. <i>et al.</i> , 2014	Pó	Granito	-	Passante peneira No.200 (125 μm)	-
Evrarn, A. <i>et al.</i> , 2020	Pó	Mármoe	2,70	<300 μm	-
Gado, R.A., 2022	Lama	Mármore e Granito	2,75	4,86μm	1250
Gencil, O. <i>et al.</i> , 2022	-	Mármore	2,69	5–22 mm	-
Gupta, L.K. <i>et al.</i> , 2018	Pó	Granito	2,46	0,189mm média	0,9 (Modulo de finura)
Jain, A. <i>et al.</i> , 2022	Não especifica - Provável Lama	Granito	2,57	<4.75 mm	1,4 (Modulo de finura)
Kabeer, K.I.S.A. <i>et al.</i> , 2018	Lama	Mármore	2,70	<1.18 mm D50=49,68μm	350
Karimipour, A. <i>et al.</i> , 2021	Lama	Mármore	2,69	-	558
Karimipour, A. <i>et al.</i> , 2021	Lama	Granito	3,05	-	510
Karmegam, A. <i>et al.</i> , 2014	Lama	Granito	2,59	-	-
Kashyap, V.S. <i>et al.</i> , 2022	Lama	Mármore	2,63	Passante peneira 90 μm	364
Kumar, V. <i>et al.</i> , 2020	Lama	Mármore	2,32	-	2,14 (módulo de finura)
Li, L.G. <i>et al.</i> , 2018	Lama	Mármore	2,70 (Densidade relativa)	<150 μm	-
Martins, M.A.B. <i>et al.</i> , 2022	Lama	Mármore e Granito	2,83	Dmáx = 300μm D50=30,8μm	0,12 (módulo de finura)
Mashaly <i>et al.</i> , 2015	Lama	Mármore	2,67	D90 <50μm D50<11μm	670 (Blaine)
Medina <i>et al.</i> , 2017	Lama	Granito	-	-	1350 (BET)

Fonte: Elaborado pela autora com base na bibliografia.

**APÊNDICE 3 – Tabela resumo da caracterização física dos MGSR da Literatura Científica
(Continuação)**

Informações Gerais			Caracterização física		
Fonte	Forma do Resíduo	Tipo do Resíduo	Massa específica γr (g/cm³)	Graulometria (μm)	Área Superficial Específica (m²/Kg)
Meera, M. <i>et al.</i> , 2018	Lama	Mármore	2,54	D50=10,21μm	-
Meera, M. <i>et al.</i> , 2019	Lama	Granito	2,37	D50=12,82μm	-
Mhamal, M.M <i>et al.</i> , 2023	Lama	Mármore	2,33	0,15<D50<0,3	2,03 (módulo de finura)
Mhamal, M.M <i>et al.</i> , 2023	Lama	Granito	2,23	0,6<D50<1,18	3,7 (módulo de finura)
Mhamal, M.M <i>et al.</i> , 2023	Lama	Mármore e Granito	2,27	0,3<D50<0,6	2,82 (módulo de finura)
Miltre, S.H.M., 2016 - RBRO G	Lama	Misturado (sem o tratamento térmico proposto no trabalho)	2,48	% Retido Peneira 200 (75μm) = 8,56 % Retido Peneira 325 (43μm) = 18,1	7277,8 (Blaine)
Miltre, S.H.M., 2016 - RBRO D	Lama	Misturado (sem o tratamento térmico proposto no trabalho)	2,53	% Retido Peneira 200 (75μm) = 3,08 % Retido Peneira 325 (43μm) = 7	6179,3 (Blaine)
Munir <i>et al.</i> , 2017	Lama	Mármore	2,69	<45μm	351 (Método de Blaine)
Nasr, M.S. <i>et al.</i> , 2020	Pó	Mármore	-	Passante peneira 150 μm (Subs. cimento) e 0.15–1.18 mm (Subs. areia)	-
Nasr, M.S. <i>et al.</i> , 2021	Pó	Granito	-	Passante peneira 150 μm (Subs. cimento) e 0.15–1.18 mm (Subs. areia)	-
Ozkiliç, Y.O. <i>et al.</i> , 2023	-	Mármore	-	-	-
Palanisamy, P. <i>et al.</i> , 2022	-	Mármore	2,45	-	-
Palanisamy, P. <i>et al.</i> , 2022	-	Granito	2,58	-	-
Pereira, M.M.L. <i>et al.</i> , 2022	Lama	Mármore e Granito	2,62	D90 = 39,09μm D50=10,51μm D10=1,28μm	-
Prokopski, G. <i>et al.</i> , 2020	Pó	Granito	-	<25mm	220-250
Rodrigues, R. <i>et al.</i> , 2015	Lama	Mármore	2,73 (Densidade Aparente)	2mm=84,2% 0,125mm=27,5% 0,063mm=16,8%	2150 (Blaine)
Sadek D.M. <i>et al.</i> , 2016	Lama	Granito	2,64	-	3040
Sadek D.M. <i>et al.</i> , 2016	Lama	Mármore	2,78	-	2420
Sadek D.M. <i>et al.</i> , 2016	Lama	Misturado (Mármore e Granito)	2,74	-	3840
Santos, W. J., 2011	Rejito de pedra triturado	Mármore	2,91	Dmáx = 4,80mm	2,58 (módulo de finura)
Sardinha M. <i>et al.</i> , 2016	Lama	Mármore	2,73	D90 < 2mm	215 (Blaine)
Segadães, A.M. <i>et al.</i> , 2005	Lama	Mármore e Granito	-	Tamanho médio 23 μm	-

Fonte: Elaborado pela autora com base na bibliografia.

APÊNDICE 4 – Tabela resumo da caracterização física dos MGSR da Literatura Científica (Final)

Informações Gerais			Caracterização física		
Fonte	Forma do Resíduo	Tipo do Resíduo	Massa específica γ_r (g/cm ³)	Graulometria (μm)	Área Superficial Específica (m ² /Kg)
Seghir, N.T. <i>et al.</i> , 2018	Lama	Mármore	2,74	D90 = 80 μm D50=30 μm D10=5 μm	3869,46 (Blaine)
Singh. M. <i>et al.</i> , 2019	Lama	Mármore	2,67	60%<300 μm	350
Singh. S. <i>et al.</i> , 2016	Lama	Granito	2,62	-	2,573 (modulo de finura)
Singh. S. <i>et al.</i> , 2016	Lama	Granito	2,56	-	2,573 (modulo de finura)
Singh. T. <i>et al.</i> , 2023	Lama	Mármore	3,11	-	-
Soares, 2014	Lama	Misturado (sem especificação)	2,53	D90 = 39,22 μm D50=11,37 μm	6179,3 (Blaine)
Song, W. <i>et al.</i> , 2022 - Amostra M0	Pó	Mármore	2,21	-	2,46 m ² /g
Sousa, A.A.P. <i>et al.</i> , 2022	Lama	Misturado	-	62.71%<44 μm	-
Souza, L.G.M. <i>et al.</i> , 2017	Lama	Mármore	-	Dmédio = 27,32 μm D90 = 69,19 μm D50=20,91 μm D10=2,04 μm	-
Souza, L.G.M. <i>et al.</i> , 2017	Lama	Mármore e Granito	-	Dmédio = 13,64 μm D90 = 31,64 μm D50=9,78 μm D10=1,48 μm	-
Syarif, M. <i>et al.</i> , 2023	Pó	Mármore	-	<200 μm	-
Tangaramvong, S. <i>et al.</i> , 2021	-	Granito	2,60	<10mm	3,24 (modulo de finura)
Teixeira, F.R. <i>et al.</i> , 2021	Lama	Rochas Ornamentais (não especifica)	2,64	D90 = 71,09 μm D50=21,91 μm D10=3,66 μm	-
Topçu, I.B. <i>et al.</i> , 2009	Lama	Mármore	2,47	-	614 (Blaine)
Valdez, P. <i>et al.</i> , 2011	Lama	Mármore	-	Tamanho médio 4 μm	-
Varadharajan, S. <i>et al.</i> , 2020	Lama	Mármore	2,64	Entre 0,5mm e 2,5mm	2,45 (Módulo de finura)
Vijayalakshmi, M. <i>et al.</i> , 2013	Pó	Granito	2,39	55% < 150 μm 31% < 45 μm	351
Xi, Y. <i>et al.</i> , 2019	Lama	Mármore	-	Entre 0,5 μm e 80 μm	-

Fonte: Elaborado pela autora com os dados das fontes inseridas na tabela.

APÊNDICE 5 – Tabela de Composição química dos resíduos de mármore encontradas na Literatura Científica

Informações Gerais		Constituintes Químicos (%)																														
Fonte	Símbolo	CaCO ₃	MgO	Al ₂ O ₃	FeO ₃	CrO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	PO ₅	FeO	SiO	MgCO ₃	Na ₂ Ze	SiO ₂	NiO ₂	MnO ₂	RuO ₄	MoO ₃	SnO ₂	Sb ₂ O ₃	Rh ₂ O ₃	Resíduo Insolúvel	Cl ⁻	CaO Livre	CO ₂	Outros	LOI				
Allabdo, A.A. et al., 2014	1,12		0,52	0,73	0,05	83,22	1,12	0,09	0,56														0,89		0,15				2,50			
Alyamir et al., 2017	28,35		16,25	0,17	9,70	40,45	0,05	0,01	0,02	0,04																			4,88			
Ashish, D.K., 2018	8,38		14,36	0,67	0,65	61,83	0,60	0,07	0,33																							
Barbosa et al., 2018	95,00																															
Benjeddou, E. et al., 2013	3,00	94,88	0,50	0,14	0,39	52,28		0,03					1,04																41,60			
Comallesi et al., 2010	66,00																															
Danish, P. et al., 2021 - Revisão	2,5 a 3,5		2 a 3	9,12 a 11,76	9,12 a 11,76	35 a 55	0,06 a 1,12	0,06 a 1,12																						38 a 43		
Dobiszewska, M. et al., 2022 - Revisão	0,18 a 6,01		0,23 a 15,21	0,29 a 0,73	0,05 a 0,80	40,73 a 83,22	0,06 a 2,44	0,06 a 1,80	0,08 a 0,56																							
Eyemany, H.E. et al., 2014	1,12		0,73	0,05	83,22				0,56																					2,50		
Evram, A. et al., 2020	0,19		0,93	0,12	0,06	56,10	0,03	0,02	0,02	0,02																						
Genel, O. et al., 2022																																
Kabeer, K.I.S.A. et al., 2018	1,57		19,85	0,18	1,18	32,19																										
Karimipour, A. et al., 2021	0,50	0,90	0,20	0,60	0,10	54,50	0,01	0,02	0,07															0,10						43,00		
Kashyap, V.S. et al., 2022																																
Kumar, V. et al., 2020	5,96		15,27	0,53	0,82	38,65	0,05	0,03	0,07																							
Li, L.G. et al., 2018																																
Mehaly et al., 2015	0,15		0,11	0,10	0,04	55,32	0,07	0,01	0,13	0,06													1,66							43,40		
Misra, M. et al., 2018																																
Muram, M.M. et al., 2023																																
Nunir et al., 2017	6,56		1,12	0,84	0,24	51,02	0,41	0,11	0,09																						38,92	
Nisar, M.S. et al., 2020	1,97		1,69	0,38	3,90	51,82	0,11	0,05	0,22																							
Oxkilig, Y.O. et al., 2023																																
Palaniandy, P. et al., 2022																																
Rodrigues, R. et al., 2015	1,29		0,64	0,32	0,14	54,20	<0,04	<0,06	<0,1															1,80	<0,01						42,80	
Sadek, D.M. et al., 2016	2,72		1,11	0,46	0,39	76,30	0,34	0,10	0,32	0,09																					17,90	
Santos, W. J., 2011			7,80			25,40																										
Sardaha, M. et al., 2016	1,39		0,64	0,32	0,14	54,20	<0,04	<0,06	<0,1																							
Saghir, N.T. et al., 2018	0,05		0,92	0,05	0,02	56,94	0,01	0,32																								41,63
Singh, M. et al., 2019	3,86		16,90	4,62	0,78	28,63																									43,30	
Singh, T. et al., 2023	4,60		0,51	0,21	52,43	0,10	0,05	0,02			0,39																				41,69	
Song, W. et al., 2022 - Amostra MO	7,92		14,32	0,69	0,64	60,40	0,34	0,01	0,05																						15,63	
Souza, L.G.M. et al., 2017																																
Syarif, M. et al., 2023	0,56		6,48			92,82									0,01	0,05	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01									41,16	
Topcu, I.B. et al., 2009	4,67		0,40		0,03	51,80																										43,35
Vahedi, P. et al., 2011	0,36		0,44	0,00	0,04	55,32	0,02	0,00	0,10																							
Vaadhavan, S. et al., 2020	5,87		15,55	0,56	0,80	41,54	0,07	0,07	0,11																							
Xi, Y. et al., 2019	1,68		1,59	1,14	0,28	53,02	0,21	0,09																								41,99

Fonte: Elaborado pela autora com base na bibliografia.

APÊNDICE 6 – Tabela de Composição mineralógica dos resíduos de mármore encontradas na Literatura Científica

Informações Gerais	Mineralogia																		
	Quartzo	Dolomita	Calcita	Diopside	Wollastonite	Caulinita	Ankerita	Hematita	Corindon	Mica	Gehlenita	Dióxido de Silício	Carbonato de Cálcio	Olivina - Forsterita	Clorita	Serpentina	Amfíbio - Tremolita	Amorfo	
Ashish, D.K., 2018	Sim	Sim																	
Benjedou, E. <i>et al.</i> , 2013	Sim		Sim (principal mineral)																
Corinaldesi <i>et al.</i> , 2010	Sim					Sim													Sim
Evrarn, A. <i>et al.</i> , 2020			Sim																
Gencele, O. <i>et al.</i> , 2022																			
Kabeer, K.I.S.A. <i>et al.</i> , 2018		Sim																	
Mashaly <i>et al.</i> , 2015			Sim																
Munir <i>et al.</i> , 2017	Sim		Sim					Sim											
Sadek D.M. <i>et al.</i> , 2016			Sim			Sim													
Santos, W. J., 2011													Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Seghir, N.T. <i>et al.</i> , 2018		Sim	Sim																
Song, W. <i>et al.</i> , 2022 - Amostra M0	Sim		Sim	Sim	Sim								Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Souza, L.G.M. <i>et al.</i> , 2017	Sim									Sim									
Varadharajan, S. <i>et al.</i> , 2020		Sim										Sim							Sim
Xi, Y. <i>et al.</i> , 2019																			Sim

Fonte: Elaborado pela autora com base na bibliografia.

APÊNDICE 7 – Tabela de Composição química dos resíduos de granito encontradas na Literatura Científica

Informações Gerais	Caracterização Química (%)																		
	Fonte	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅	FeO	BaO	Cl	Resíduo Insolúvel	Outros	Alkali	LOI
Allam M. E. <i>et al.</i> , 2014	59,58	0,29	13,01	9,77	3,80	5,92	4,76	0,33	0,17	0,37	0,07		0,09						1,56
Azevedo, A.R.G. <i>et al.</i> , 2019	63,23		15,34	3,53	3,34	3,04	5,34	1,52		1,13				0,34					1,34
Boadella, I.L. <i>et al.</i> , 2019	76,33	0,21	11,87	2,00	0,43	2,95	5,05		0,02	0,13	0,02								0,77
Chen, J.J. <i>et al.</i> , 2020	67,91	0,51	13,13	1,97	2,98	4,69	3,91			0,36	0,38								2,91
Dobiszewska, M. <i>et al.</i> , 2022 - Revisão	51,98 a 85,50	0,58 a 2,50	2,1 a 16,30	0,40 a 27,89	1,82 a 5,90	2,02 a 3,69	2,99 a 4,12	0,05 a 1,80											
Elymany, H.E. <i>et al.</i> , 2014	92,40		1,25	0,40	1,00			3,80											1,10
Gupta, L.K. <i>et al.</i> , 2018	74,39	0,38	13,50	0,86	0,41	4,16	4,79		0,08	0,17	0,02								
Jain, A. <i>et al.</i> , 2022	69,77	0,54	10,74	1,80	0,89	3,13	4,84												
Karimpour, A. <i>et al.</i> , 2021	71,00	0,90	15,38	1,30	1,70	2,90	4,40		0,02	0,40	0,20	1,80							
Karmegam, A. <i>et al.</i> , 2014	61,40	1,70	16,30	3,60	3,60	3,59	4,04	0,05							0,90		6,20		5,00
Medina <i>et al.</i> , 2017	69,60	1,60	14,99	2,52	2,36	3,59	4,04		0,04	0,51	0,17								0,52
Meera, M. <i>et al.</i> , 2019																			
Mharmal, M.M <i>et al.</i> , 2023																			
Nasr, M.S. <i>et al.</i> , 2021	72,37	0,38	8,10	1,94	1,46	3,65	3,91	-											
Palanisamy, P. <i>et al.</i> , 2022																			
Prokopski, G. <i>et al.</i> , 2020																			
Sadek D.M. <i>et al.</i> , 2016	72,90	1,58	13,40	1,08	1,25	3,83	3,64	0,06		0,14	0,04								1,81
Singh, S. <i>et al.</i> , 2016	72,57	0,83	15,63			4,21	6,76												
Singh, S. <i>et al.</i> , 2016	72,57	0,83	15,63			4,21	6,76												
Tangaramvong, S. <i>et al.</i> , 2021																			
Vijayalakshmi, M. <i>et al.</i> , 2013	72,14		17,13																

Fonte: Elaborado pela autora com base na bibliografia.

APÊNDICE 8 – Tabela de Composição mineralógica dos resíduos de granito encontradas na Literatura Científica

Informações Gerais	Mineralogia												
	Quartzo	Muscovita	Microclina	Anorthide	Chamosita	Biotita ou Biotite	Caulinita	Albita ou Albite	Ortoclase	Dickite	Hematita	Mica	Plagioclase
Fonte													
Allam M. E. <i>et al.</i> , 2014													
Azevedo, A.R.G. <i>et al.</i> , 2019													
Boadella, J.L. <i>et al.</i> , 2019													
Chen, J.J. <i>et al.</i> , 2020													
Dobiszewska, M. <i>et al.</i> , 2022 - Revisão													
Elyamany, H.E. <i>et al.</i> , 2014													
Gupta, L.K. <i>et al.</i> , 2018	Sim								Sim				
Jain, A. <i>et al.</i> , 2022	Sim		Sim					Sim					
Karimipour, A. <i>et al.</i> , 2021													
Karnegam, A. <i>et al.</i> , 2014													
Medina <i>et al.</i> , 2017	Sim	Sim			Sim	Sim	Sim	Sim	Sim				
Meera, M. <i>et al.</i> , 2019													
Mhamal, M.M <i>et al.</i> , 2023													
Nasr, M.S. <i>et al.</i> , 2021													
Palanisamy, P. <i>et al.</i> , 2022													
Prokopski, G. <i>et al.</i> , 2020													
Sadek D.M. <i>et al.</i> , 2016	Sim		Sim					Sim		Sim			
Singh, S. <i>et al.</i> , 2016													
Singh, S. <i>et al.</i> , 2016													
Tangaramvong, S. <i>et al.</i> , 2021													
Vijayalakshmi, M. <i>et al.</i> , 2013	Sim (3%)		Sim (1%)							Sim	Sim	Sim	Sim

Fonte: Elaborado pela autora com base na bibliografia.

APÊNDICE 9 – Tabela de Composição química dos resíduos misturados encontradas na Literatura Científica

Informações Gerais		Composição Química (%)																LUI														
Fonte	Tipo do Resíduo	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	MnO	TiO ₂	PO ₄	C	FeO	SiO	B ₂ O ₃	ZnO	Rb ₂ O	As ₂ O ₃	Y ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Sc ₂ O ₃	SrO	NiO	MO	Gd ₂ O ₃	G	Outros	LUI			
Arns et al., 2013 - Amostra C1	Granito, Mármore, Quartzo, Cerâmicas, Porcelanatos, Ardósia e Pedra São Tomé	44,75	4,32	10,41	3,84	14,79	1,98	2,82		0,06	0,73	0,34	2,34																	13,59		
Arns et al., 2013 - Amostra C2	Granito, Mármore, Quartzo, Cerâmicas, Porcelanatos, Ardósia e Pedra São Tomé	53,24	3,51	11,66	4,19	9,80	2,30	3,35		0,06	0,81	0,36	2,73																	8,87		
Arns et al., 2013 - Amostra S1	Granito e Mármore	47,62	3,38	9,32	2,69	15,48	1,93	3,17		0,04	0,52	0,25	1,61																	13,97		
Arns et al., 2013 - Amostra S2	Granito e Mármore	42,39	3,85	7,99	2,60	18,82	1,83	2,57		0,04	0,68	0,33	1,65																	17,23		
Arns et al., 2013 - Amostra N1	Granito, Mármore, Porcelanatos e Silestone	56,87	2,99	12,65	3,95	7,98	2,63	4,15		0,06	0,76	0,33	2,58																	5,84		
Arns et al., 2013 - Amostra N2	Granito, Mármore, Porcelanatos e Silestone	42,14	5,34	9,54	3,73	15,82	1,96	3,08		0,05	0,86	0,44	2,07					0,04	0,03	0,01										14,95		
Apoelino, E. C. A., 2014	Mármore e Granito	37,60	8,21		4,89	17,70	1,79	2,50		0,07	0,78	0,33																			17,29	
Bacchi, E. et al., 2013 - Amostra A	Mármore e Granito	58,67	2,96	11,26	7,99	6,13	2,74	2,90	0,04																						5,99	
Bacchi, E. et al., 2013 - Amostra B	Mármore e Granito	54,62	3,22	9,70	5,86	12,99	2,15	0,35	0,02																						9,57	
Bacchi, E. et al., 2013 - Amostra C	Mármore e Granito	54,10	1,72	10,28	7,26	11,27	2,84	3,94	0,03																						7,84	
Braga, F.C.S. et al., 2023	Mármore, Granito, Gneise e Gábio	38,03	0,92	14,04	9,11	7,72		6,96		0,18	0,15	1,35	0,63		0,18	0,55	0,10	0,04	0,03	0,01												
Cor, A.C.F., 2019	Mármore e Granito	16,08	6,88	2,09	2,85	35,45	0,55	0,27		0,10	0,08	0,25	0,05				0,03				0,02										35,19	
Goh, R.A., 2022	Mármore e Granito	52,50	5,65	9,95		18,01																										
Martins, M.A.B. et al., 2022	Mármore e Granito	63,75	0,31	14,35	7,57	3,72	3,38	5,01		0,06			0,39																			0,69
Whamal, M.M. et al., 2023	Mármore e Granito	66,80	0,98	13,50	3,79	3,44	3,50	3,83		0,06			1,11																			3,50
Milnes, S.H.M., 2016 - RBRO G	Misturado (sem o tratamento térmico proposto no trabalho)	69,55	0,70	15,24	2,55	2,36		5,56		0,19	0,04	0,42			0,04		0,01															0,75
Peña, M.M.L. et al., 2022	Mármore e Granito	52,50	6,65	9,95	5,34	18,01	2,62	3,00		0,39		0,07																				2,01
Sakk, D.M. et al., 2016	Misturado (Mármore e Granito)	66,80	0,98	13,50	3,79	3,44	3,50	3,83		0,06			1,11																			42,60
Segalães, A.M. et al., 2005	Mármore e Granito	49,47	2,21	14,39	11,76	8,79	1,99	6,28		0,18	0,17	1,14	0,15		0,08		0,07	0,02			0,06											
Sousa, A.A.P. et al., 2022	Misturado	49,47	2,21	14,39	11,76	8,79	1,99	6,28		0,18	0,17	1,14	0,15		0,08		0,07	0,02			0,06											
Sousa, L.G.M. et al., 2017	Mármore e Granito	34,09	18,77	13,57	12,18	20,29				0,18	0,18	1,44			0,10		0,12	0,12														0,03
Taveira, F.R. et al., 2021	Rochas Granuladas (tipo específico)	34,09	18,77	13,57	12,18	20,29				0,18	0,18	1,44			0,10		0,12	0,12														0,03

Fonte: Elaborado pela autora com base na bibliografia.

APÊNDICE 10 – Tabela de Composição mineralógica dos resíduos misturados encontradas na Literatura Científica

Informações Gerais		Mineralogia																	
Fonte	Tipo do Resíduo	Quartzo	Muscovita	Dolomita	Microclina	Anortite	Calcita	Biotita ou Biotite	Caulinita	Albita ou Albite	Ortoclase	Dickite	Oligoclase	Cordierite	Merfinoite	Feldspato	Hematita	Mica	Falalite
Almada <i>et al.</i> , 2023 - Amostra C1	Granito, Mármore, Quartzito, Cerâmicas, Porcelanatos, Ardósia e Pedra São Tomé	11,5		19,1			8,2	6,8		8,0	5,9		30,7	2,9	3,3				
Almada <i>et al.</i> , 2023 - Amostra C2	Granito, Mármore, Quartzito, Cerâmicas, Porcelanatos, Ardósia e Pedra São Tomé	16,1		12,0			4,5	2,3		16,0	8,8		32,1	2,9	4,1				
Almada <i>et al.</i> , 2023 - Amostra S1	Granito e Mármore	11,8		8,1			2,4	4,3		15,2	10,4		38,0	2,8	2,6				
Almada <i>et al.</i> , 2023 - Amostra S2	Granito e Mármore	14,6		17,2			13,2	3,9		5,2	8,4		30,9	1,6	0,0				
Almada <i>et al.</i> , 2023 - Amostra N1	Granito, Mármore, Porcelanato e Silestone	16,1		11,2			12,6	2,3		4,4	11,2		31,9	1,6	1,4				
Almada <i>et al.</i> , 2023 - Amostra N2	Granito, Mármore, Porcelanato e Silestone	8,1		21,2			8,8	4,4		9,2	10,3		26,9	1,6	1,8				
Apolinário, E. C. A., 2014	Mármore e Granito	Sim		Sim														Sim	
Bacarli, E. <i>et al.</i> , 2013 - Amostra A	Mármore e Granito	Sim	Sim	Sim															
Bacarli, E. <i>et al.</i> , 2013 - Amostra B	Mármore e Granito	Sim	Sim	Sim															
Bacarli, E. <i>et al.</i> , 2013 - Amostra C	Mármore e Granito	Sim	Sim	Sim															
Braga, F.C.S. <i>et al.</i> , 2023	Mármares, Granito, Gnaíse e Gábrro	23,1					2,8	6,7	Sim (não quantificado)		19,4		48,0						
Cruz, A.C.F., 2019	Mármore e Granito	Sim																	
Gado, R.A., 2022	Mármore e Granito	Sim																	
Martins, M.A.B. <i>et al.</i> , 2022	Mármore e Granito	Sim																	
Mhamal, M.M. <i>et al.</i> , 2023	Mármore e Granito																		
Miltre, S.H.M., 2016 - RBRO G	Misturado (sem o tratamento térmico proposto no trabalho)																		
Miltre, S.H.M., 2016 - RBRO D	Misturado (sem o tratamento térmico proposto no trabalho)																		
Pereira, M.M.L. <i>et al.</i> , 2022	Mármore e Granito	Sim	Sim						Sim	Sim									
Sadek D.M. <i>et al.</i> , 2016	Misturado (Mármore e Granito)	Sim		Sim															
Segadães, A.M. <i>et al.</i> , 2005	Mármore e Granito																		
Soares, 2014	Misturado (sem especificação)																		
Sousa, A.A.P. <i>et al.</i> , 2022	Misturado	Sim						Sim											
Souza, L.G.M. <i>et al.</i> , 2017	Mármore e Granito	Sim					Sim												Sim
Teixeira, F. R. <i>et al.</i> , 2021	Rochas Ornamentais (não específica)	Sim			Sim			Sim		Sim									

Fonte: Elaborado pela autora com base na bibliografia.

APÊNDICE 11 – Aplicações de resíduos de rochas ornamentais em materiais (matrizes) cimentícias obtidas na Literatura Científica

Informações Gerais				
Fonte	Forma do Resíduo	Tipo do Resíduo	Aplicação	Compósito estudado
Aliabdo, A.A. <i>et al.</i> , 2014	Lama	Mármore	Subs. Cimento e Areia	Cimento modificado e concreto
Allam M. E. <i>et al.</i> , 2014	Lama	Granito	Subs. Cimento e Areia	Concreto
Almada <i>et al.</i> , 2023 - Amostra C1	Lama	Granito, Mármore, Quartzito, Ceramicas, Porcelanatos, Ardósia e Pedra São Tomé	Subs. Cimento	Argamassas estruturais
Almada <i>et al.</i> , 2023 - Amostra C2	Lama	Granito, Mármore, Quartzito, Ceramicas, Porcelanatos, Ardósia e Pedra São Tomé	Subs. Cimento	Argamassas estruturais
Almada <i>et al.</i> , 2023 - Amostra S1	Lama	Granito e Mármore	Subs. Cimento	Argamassas estruturais
Almada <i>et al.</i> , 2023 - Amostra S2	Lama	Granito e Mármore	Subs. Cimento	Argamassas estruturais
Almada <i>et al.</i> , 2023 - Amostra N1	Lama	Granito, Mármore, Porcelanato e Silestone	Subs. Cimento	Argamassas estruturais
Almada <i>et al.</i> , 2023 - Amostra N2	Lama	Granito, Mármore, Porcelanato e Silestone	Subs. Cimento	Argamassas estruturais
Alyamac <i>et al.</i> , 2017	Lama	Mármore	Adição	Concreto Auto-Adensável
Apolinário, E. C. A., 2014	Lama	Mármore e Granito	Adição Mineral	Argamassa comum, mista e industrializada
Ashish, D.K., 2018	Pó (não especifica se provem da lama)	Mármore	Subs. Cimento e Areia	Concreto
Azevedo, A.R.G. <i>et al.</i> , 2019	Lama	Granito	Subs. Areia	Argamassas de Revestimento
Bacarji, E. <i>et al.</i> , 2013 - Amostra A	Lama	Mármore e Granito	Subs. Cimento	Concreto
Bacarji, E. <i>et al.</i> , 2013 - Amostra B	Lama	Mármore e Granito	Subs. Cimento	Concreto
Bacarji, E. <i>et al.</i> , 2013 - Amostra C	Lama	Mármore e Granito	Subs. Cimento	Concreto
Barbosa <i>et al.</i> , 2018	Lama	Mármore	Subs. Areia	Argamassas
Benjeddou, E. <i>et al.</i> , 2013	Lama	Mármore	Filler (Adição Mineral)	Viabilidade da aplicação em Compositos Cimentício
Boadella, I.L. <i>et al.</i> , 2019	Lama	Granito	Adição Mineral (Subst. Micro Quartzo/Pó de Quartzo)	Concreto de Alta Performance (UHPC)
Chen, J.J. <i>et al.</i> , 2020	Lama	Granito	Subs. Areia	Argamassas
Corinaldesi <i>et al.</i> , 2010	Lama	Mármore	Subs. Cimento e Areia	Argamassas e Concreto

Fonte: Elaborado pela autora com base na bibliografia.

APÊNDICE 12 – Aplicações de resíduos de rochas ornamentais em materiais (matrizes) cimentícias obtidas na Literatura Científica (Continuação)

Informações Gerais				
Fonte	Forma do Resíduo	Tipo do Resíduo	Aplicação	Compósito estudado
Cruz, A.C.F., 2019	Lama	Mármore e Granito	Subs. Cimento	Pavers
Danish, P. <i>et al</i> ., 2021 - Revisão	Lama	Mármore	Adição Mineral	Concreto Auto-Adensável
Dobiszewska, M. <i>et al</i> ., 2022 - Revisão	Pó	Mármore	Agregado fino	Concretos e argamassas
Dobiszewska, M. <i>et al</i> ., 2022 - Revisão	Pó	Granito	Agregado fino	Concretos e argamassas
Dobiszewska, M. <i>et al</i> ., 2022 - Revisão	Pó	Basalto	Agregado fino	Concretos e argamassas
Elyamany, H.E. <i>et al</i> ., 2014	Pó	Mármore	Adição Mineral	Concreto Auto-Adensável
Elyamany, H.E. <i>et al</i> ., 2014	Pó	Granito	Adição Mineral	Concreto Auto-Adensável
Evrarn, A. <i>et al</i> ., 2020	Pó	Mármore	Adição	Concreto de Alta Resistencia
Gado, R.A., 2022	Lama	Mármore e Granito	Adição	Argamassa colante
Gencil, O. <i>et al</i> ., 2022	-	Mármore	Subs. Agregado Graudo	Concreto
Gupta, L.K. <i>et al</i> ., 2018	Pó	Granito	Subs. Areia	Argamassa
Jain, A. <i>et al</i> ., 2022	Não específica - Provável Lama	Granito	Subs. Areia	Concreto Auto-Adensável
Kabeer, K.I.S.A. <i>et al</i> ., 2018	Lama	Mármore	Subs. Areia	Argamassas
Karimipour, A. <i>et al</i> ., 2021	Lama	Mármore	Adição Mineral (Filler)	Concreto Auto-Adensável reforçado com fibra de aço
Karimipour, A. <i>et al</i> ., 2021	Lama	Granito	Adição Mineral (Filler)	Concreto Auto-Adensável reforçado com fibra de aço
Karmegam, A. <i>et al</i> ., 2014	Lama	Granito	Adição Mineral	Concreto Auto-Adensável
Kashyap, V.S. <i>et al</i> ., 2022	Lama	Mármore	Subs. Cimento	Concreto Nanomodificado
Kumar, V. <i>et al</i> ., 2020	Lama	Mármore	Subs. Cimento	Concreto
Li, L.G. <i>et al</i> ., 2018	Lama	Mármore	Adição Mineral (Subs. Pasta de cimento)	Argamassa
Martins, M.A.B. <i>et al</i> ., 2022	Lama	Mármore e Granito	Adição Mineral	Concreto Auto-Adensavel de alta performance
Mashaly <i>et al</i> ., 2015	Lama	Mármore	Subs. Cimento	Compositos de cimento/Bloquete de concreto
Medina <i>et al</i> ., 2017	Lama	Granito	Subs. Clinker no cimento	Materiais cimenticios suplementares
Meera, M. <i>et al</i> ., 2018	Lama	Mármore	Adição Mineral	Concreto Auto Adensavel
Meera, M. <i>et al</i> ., 2019	Lama	Granito	Adição Mineral	Concreto Auto Adensavel

Fonte: Elaborado pela autora com base na bibliografia.

APÊNDICE 13 – Aplicações de resíduos de rochas ornamentais em materiais (matrizes) cimentícias obtidas na Literatura Científica (Continuação)

Informações Gerais				
Fonte	Forma do Resíduo	Tipo do Resíduo	Aplicação	Compósito estudado
Mhamal, M.M <i>et al.</i> , 2023	Lama	Mármore	Subs. Areia	Concreto
Mhamal, M.M <i>et al.</i> , 2023	Lama	Granito	Subs. Areia	Concreto
Mhamal, M.M <i>et al.</i> , 2023	Lama	Mármore e Granito	Subs. Areia	Concreto
Miltre, S.H.M., 2016 - RBRO G	Lama	Misturado (sem o tratamento térmico proposto no trabalho)	Adição Mineral (Material pozolânico - após tratamento termico do resíduo)	Concreto
Miltre, S.H.M., 2016 - RBRO D	Lama	Misturado (sem o tratamento térmico proposto no trabalho)	Adição Mineral (Material pozolânico - após tratamento termico do resíduo)	Concreto
Munir <i>et al.</i> , 2017	Lama	Mármore	Subs. Cimento	Argamassa - Concreto
Nasr, M.S. <i>et al.</i> , 2020	Pó	Mármore	Subs. Cimento e Areia	Argamassa
Nasr, M.S. <i>et al.</i> , 2021	Pó	Granito	Subs. Cimento e Areia	Argamassa
Ozkiliç, Y.O. <i>et al.</i> , 2023	-	Mármore	Subs. Cimento	Concreto
Palanisamy, P. <i>et al.</i> , 2022	-	Mármore	Subs. Areia	Concreto Auto-Adensável
Palanisamy, P. <i>et al.</i> , 2022	-	Granito	Subs. Areia	Concreto Auto-Adensável
Pereira, M.M.L. <i>et al.</i> , 2022	Lama	Mármore e Granito	Adição mineral	Concreto Auto-Adensável
Prokopski, G. <i>et al.</i> , 2020	Pó	Granito	Subs. Areia	Concreto
Rodrigues, R. <i>et al.</i> , 2015	Lama	Mármore	Subs. Cimento	Concreto
Sadek D.M. <i>et al.</i> , 2016	Lama	Granito	Adição mineral	Concreto Auto Adensavel
Sadek D.M. <i>et al.</i> , 2016	Lama	Mármore	Adição mineral	Concreto Auto Adensavel
Sadek D.M. <i>et al.</i> , 2016	Lama	Misturado (Mármore e Granito)	Adição mineral	Concreto Auto Adensavel
Santos, W. J., 2011	Rejito de pedra triturado	Mármore	Subs. Areia	Argamassa estrutural
Sardinha M. <i>et al.</i> , 2016	Lama	Mármore	Subs. Cimento	Concreto
Segadães, A.M. <i>et al.</i> , 2005	Lama	Mármore e Granito	-	Produtos Argilosos
Seghir, N.T. <i>et al.</i> , 2018	Lama	Mármore	Subs. Cimento	Pasta de Cimento

Fonte: Elaborado pela autora com base na bibliografia.

APÊNDICE 14 – Aplicações de resíduos de rochas ornamentais em materiais (matrizes) cimentícias obtidas na Literatura Científica (Final)

Informações Gerais				
Fonte	Forma do Resíduo	Tipo do Resíduo	Aplicação	Compósito estudado
Singh. M. <i>et al.</i> , 2019	Lama	Mármore	Subs. Cimento	Concreto
Singh. S. <i>et al.</i> , 2016	Lama	Granito	Subs. Areia	Concreto
Singh. S. <i>et al.</i> , 2016	Lama	Granito	Subs. Areia	Concreto
Singh. T. <i>et al.</i> , 2023	Lama	Mármore	Subs. Cimento	Concreto Permeável
Soares, 2014	Lama	Misturado (sem especificação)	Adição	Concreto
Song, W. <i>et al.</i> , 2022 - Amostra M0	Pó	Mármore	Subs. Areia	Argamassa
Souza, L.G.M. <i>et al.</i> , 2017	Lama	Mármore	-	Blocos
Souza, L.G.M. <i>et al.</i> , 2017	Lama	Mármore e Granito	-	Blocos
Syarif, M. <i>et al.</i> , 2023	Pó	Mármore	Subs. Cimento	Concreto com grafite carbono
Tangaramvong, S. <i>et al.</i> , 2021	-	Granito	Subs. Areia	Concreto e Concreto de alta resistencia
Teixeira, F.R. <i>et al.</i> , 2021	Lama	Rochas Ornamentais (não especifica)	Subs. Cimento	Concreto
Topçu, I.B. <i>et al.</i> , 2009	Lama	Mármore	Adição mineral (Filler)	Concreto Auto Adensavel
Valdez, P. <i>et al.</i> , 2011	Lama	Mármore	Adição mineral (Filler)	Concreto Auto Adensavel
Varadharajan, S. <i>et al.</i> , 2020	Lama	Mármore	Subs. Areia	Concreto
Vijayalakshmi, M. <i>et al.</i> , 2013	Pó	Granito	Subs. Areia	Concreto
Xi, Y. <i>et al.</i> , 2019	Lama	Mármore	Subs. Areia	Argamassa

Fonte: Elaborado pela autora com base na bibliografia.

APÊNDICE 15 – Compósitos estudados encontrados na Literatura Científica que considera os resíduos de rochas ornamentais como adição mineral.

Informações Gerais				
Fonte	Forma do Resíduo	Tipo do Resíduo	Aplicação	Compósito estudado
Informações Gerais				
Fonte	Aplicação		Compósito estudado	
Alyamac <i>et al.</i> , 2017	Adição		Concreto Auto-Adensável	
Apolinário, E. C. A., 2014	Adição Mineral		Argamassa comum, mista e industrializada	
Benjeddou, E. <i>et al.</i> , 2013	Filler (Adição Mineral)		Viabilidade da aplicação em Compositos Cimentício	
Boadella, I.L. <i>et al.</i> , 2019	Adição Mineral (Subst. Micro Quartzo/Pó de Quartzo)		Concreto de Alta Performance (UHPC)	
Danish, P. <i>et al.</i> , 2021 - Revisão	Adição Mineral		Concreto Auto-Adensável	
Elyamany, H.E. <i>et al.</i> , 2014	Adição Mineral		Concreto Auto-Adensável	
Elyamany, H.E. <i>et al.</i> , 2014	Adição Mineral		Concreto Auto-Adensável	
Evrarn, A. <i>et al.</i> , 2020	Adição		Concreto de Alta Resistencia	
Gado, R.A., 2022	Adição		Argamassa colante	
Karimipour, A. <i>et al.</i> , 2021	Adição Mineral (Filler)		Concreto Auto-Adensável reforçado com fibra de aço	
Karimipour, A. <i>et al.</i> , 2021	Adição Mineral (Filler)		Concreto Auto-Adensável reforçado com fibra de aço	
Karmegam, A. <i>et al.</i> , 2014	Adição Mineral		Concreto Auto-Adensável	
Li, L.G. <i>et al.</i> , 2018	Adição Mineral (Subs. Pasta de cimento)		Argamassa	
Martins, M.A.B. <i>et al.</i> , 2022	Adição Mineral		Concreto Auto-Adensavel de alta performance	
Meera, M. <i>et al.</i> , 2018	Adição Mineral		Concreto Auto Adensavel	
Meera, M. <i>et al.</i> , 2019	Adição Mineral		Concreto Auto Adensavel	
Miltre, S.H.M., 2016 - RBRO G	Adição Mineral (Material pozolânico - após tratamento termico do resíduo)		Concreto	
Miltre, S.H.M., 2016 - RBRO D	Adição Mineral (Material pozolânico - após tratamento termico do resíduo)		Concreto	
Pereira, M.M.L. <i>et al.</i> , 2022	Adição mineral		Concreto Auto-Adensável	
Sadek D.M. <i>et al.</i> , 2016	Adição mineral		Concreto Auto Adensavel	
Sadek D.M. <i>et al.</i> , 2016	Adição mineral		Concreto Auto Adensavel	
Sadek D.M. <i>et al.</i> , 2016	Adição mineral		Concreto Auto Adensavel	
Soares, 2014	Adição		Concreto	
Topçu, I.B. <i>et al.</i> , 2009	Adição mineral (Filler)		Concreto Auto Adensavel	
Valdez, P. <i>et al.</i> , 2011	Adição mineral (Filler)		Concreto Auto Adensavel	

Fonte: Elaborado pela autora com base na bibliografia.