



UNIVERSIDADE DE PERNAMBUCO
ESCOLA POLITÉCNICA DE PERNAMBUCO
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

**EFEITOS DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE PÓ DE
PEDRA EM ARGAMASSAS**

JOSÉ ÁLLEF FERREIRA DANTAS

RECIFE, PE

2024



UNIVERSIDADE DE PERNAMBUCO
ESCOLA POLITÉCNICA DE PERNAMBUCO
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

JOSÉ ÁLLEF FERREIRA DANTAS

**EFEITOS DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE PÓ DE
PEDRA EM ARGAMASSAS**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Escola Politécnica de Pernambuco da Universidade de Pernambuco para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Construção Civil

Orientadora: Prof. Dr^a. Nathalia Bezerra de Lima

Coorientadora: Prof. Dr^a. Stela Fucale Sukar

RECIFE, PE

2024

JOSÉ ÁLLEF FERREIRA DANTAS

**EFEITOS DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE PÓ DE PEDRAEM
ARGAMASSAS**

BANCA EXAMINADORA:

Orientadora

Documento assinado digitalmente
 **NATHALIA BEZERRA DE LIMA**
Data: 28/05/2024 14:50:36-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Nathália Bezerra de Lima
Universidade Federal de Pernambuco

Coorientadora

Documento assinado digitalmente
 **STELA FUCALE SUKAR**
Data: 24/06/2024 16:47:58-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Stela Fucale Sukar
Universidade de Pernambuco

Examinadores

Documento assinado digitalmente
 **ELIANA CRISTINA BARRETO MONTEIRO**
Data: 27/05/2024 16:52:38-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Eliana Cristina Barreto Monteiro
Universidade de Pernambuco

Documento assinado digitalmente
 **ANGELO JUST DA COSTA E SILVA**
Data: 27/05/2024 17:05:17-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Angelo Just da Costa e Silva
Universidade Católica de Pernambuco

Recife-PE
2024

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Universidade de Pernambuco

Dantas, José Álef Ferreira

D192e Efeitos da incorporação de resíduos de pó de pedra em argamassas. / José Álef Ferreira Dantas. – Recife: UPE, Escola Politécnica, 2024.

78 f. il.

Orientadora: Profa. Dra. Nathalia Bezerra de Lima

Coorientadora: Profa. Dra. Stela Fucale Sukar

Dissertação (Mestrado – Construção Civil) Universidade de Pernambuco, Escola Politécnica de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2024.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha mais profunda gratidão a todos aqueles que contribuíram para a realização desta dissertação. Primeiramente, agradeço à professora Nathalia Lima por sua orientação incansável, paciência e suporte ao longo deste percurso. Sua expertise e conselhos valiosos foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho. Também gostaria de agradecer à professora Stela Fucale, minha coorientadora, por seu apoio e parceria que tanto contribuíram para o desenvolvimento da pesquisa.

Aos meus colegas de trabalho do Instituto Nacional de Tecnologia e Materiais (INTM) através do Laboratório de Engenharia Molecular (LEM), sou imensamente grato pelo apoio contínuo e pela colaboração em diversas etapas deste projeto. A troca de ideias e o ambiente de trabalho colaborativo no INTM foram essenciais para o avanço das minhas pesquisas.

Gostaria de agradecer também aos membros da banca examinadora por suas contribuições críticas e construtivas. Suas observações e sugestões foram de extrema importância para o aprimoramento deste trabalho. Agradeço pelo tempo dedicado à leitura e avaliação desta dissertação.

A todos os meus amigos, familiares e demais colegas que, de alguma forma, contribuíram para esta jornada, meu sincero obrigado. Seu apoio moral e incentivo foram fundamentais para que eu pudesse concluir esta etapa com sucesso.

Por fim, agradeço a todas as instituições e pessoas que, direta ou indiretamente, proporcionaram meios e motivação para que este trabalho pudesse ser realizado.

Muito obrigado a todos!

RESUMO

O crescimento populacional impulsiona a construção civil com a construção de habitações e melhorias na infraestrutura das cidades. Entretanto, um dos grandes problemas na construção civil é a mitigação da geração dos resíduos sólidos, visto que é o seguimento econômico que mais descarta materiais no meio ambiente. Além do destarte de insumos, a construção civil consome muitos recursos naturais, como areias, calcário para a produção de cimento e britagem de rochas para a produção das britas. Durante o processo de britagem, os agregados em suas diversas granulometrias são segregados, mas o resíduo do pó de pedra, em alguns casos, é descartado em função da escassez de uso do material nos compósitos cimentícios. Assim, o presente estudo tem por objetivo analisar a incorporação do resíduo de pó de pedra em argamassas com adições e substituições nas massas de cimento, areia e cal hidratada. Os resultados são satisfatórios, considerando que a adição do material na composição das argamassas aumentou a resistência à compressão do material, havendo também um melhor índice de consistência das argamassas quando substituído pela cal hidratada, tal como benefícios em sua composição química, obtido através do ensaio de FRX. As análises químicas indicaram que a incorporação de resíduos beneficiou o compósito cimentício, pois, dependendo de sua formação geológica, esses resíduos podem conter compostos calcários semelhantes aos encontrados no cimento, favorecendo a obtenção de argamassas quimicamente uniformes. As argamassas com adição e substituição de resíduos demonstraram um comportamento uniforme em relação à absorção de água por capilaridade, o que melhorou suas características e ampliou sua aplicabilidade. No que diz respeito à resistência à tração na flexão, as argamassas que substituíram 10% da areia por resíduo mostraram uma resistência superior, similar ao observado na resistência à compressão. Os testes de resistência à compressão revelaram que a substituição de 10% de areia por resíduo não difere da mistura de referência, que não contém resíduos. No entanto, foi observado um aumento na resistência quando há substituição parcial de areia por resíduos, sugerindo que essa prática é uma alternativa viável para argamassas em regiões que requerem maior resistência à compressão. Adicionalmente, a análise detalhada da composição química dos resíduos revelou que a presença de compostos calcários pode melhorar substancialmente as propriedades mecânicas das argamassas. Essa melhoria é comprovada pelos testes de resistência à compressão e tração na flexão, onde as misturas contendo resíduos apresentaram desempenho superior. A uniformidade na absorção de água por capilaridade também é um aspecto positivo, indicando que a adição de resíduos pode aumentar a durabilidade e resistência a longo prazo das argamassas. Dados resultados, considerando as características dos materiais utilizados, sugerem que a utilização de resíduos não apenas promove a sustentabilidade, ao diminuir a extração de matérias-primas, mas também oferece benefícios técnicos importantes. Assim, a inclusão de resíduos em argamassas cimentícias é uma prática vantajosa do ponto de vista ambiental e técnico, especialmente em projetos que exigem materiais com alta resistência mecânica e durabilidade. A análise global do produto gerado pela incorporação do resíduo nas argamassas, relata uma solução viável para a construção civil, como em argamassas de assentamento de blocos, camadas de regularização, regiões que demandam materiais com maiores densidades, dentre outras aplicações na construção civil.

Palavras-chave: resíduos sólidos; pó de pedras; argamassa sustentável; argamassa de assentamento.

ABSTRACT

Population growth drives the construction industry with the building of housing and improvements in city infrastructure. However, one of the major problems in construction is mitigating the generation of solid waste, as it is the economic sector that discards the most materials into the environment. In addition to the disposal of inputs, the construction industry consumes many natural resources, such as sand, limestone for cement production, and crushed rocks for gravel production. During the crushing process, aggregates of various granulometries are segregated, but the stone dust residue, in some cases, is discarded due to the lack of use of the material in cementitious composites. Therefore, this study aims to analyze the incorporation of stone dust residue in mortars with additions and substitutions in the masses of cement, sand, and hydrated lime. The results are satisfactory, considering that the addition of the material to the mortar compositions increased the compressive strength of the material, with also a better consistency index of the mortars when replaced by hydrated lime, as well as benefits in its chemical composition, obtained through the XRF test. Chemical analyses indicated that the incorporation of residues benefited the cementitious composite, as depending on its geological formation, these residues may contain limestone compounds similar to those found in cement, favoring the production of chemically uniform mortars. Mortars with the addition and substitution of residues demonstrated uniform behavior in relation to capillary water absorption, which improved their characteristics and expanded their applicability. Regarding flexural tensile strength, mortars that replaced 10% of sand with residue showed superior strength, similar to that observed in compressive strength. Compression strength tests revealed that the substitution of 10% sand with residue does not differ from the reference mixture, which does not contain residues. However, an increase in strength was observed when there is partial replacement of sand with residues, suggesting that this practice is a viable alternative for mortars in regions requiring higher compressive strength. Additionally, detailed analysis of the chemical composition of the residues revealed that the presence of limestone compounds can substantially improve the mechanical properties of the mortars. This improvement is evidenced by the compressive strength and flexural tensile tests, where mixtures containing residues performed better. The uniformity in capillary water absorption is also a positive aspect, indicating that the addition of residues can increase the long-term durability and resistance of the mortars. The results, considering the characteristics of the materials used, suggest that the use of residues not only promotes sustainability by reducing the extraction of raw materials but also offers important technical benefits. Thus, the inclusion of residues in cementitious mortars is an advantageous practice from an environmental and technical perspective, especially in projects requiring materials with high mechanical strength and durability. The overall analysis of the product generated by the incorporation of the residue in mortars reports a viable solution for the construction industry, such as in block laying mortars, leveling layers, regions demanding materials with higher densities, among other applications in construction.

Keywords: solid waste; stone dust; sustainable mortar; bedding mortar.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Preço cobrado pelo aluguel das caçambas	21
Figura 2 – Problemas enfrentados pelas empresas de aluguel de caçambas	21
Figura 3 – Difração de Raio-X argamassas com RCD	24
Figura 4 – Características das argamassas com resíduo de pó de pedra	25
Figura 5 – Resultados dos ensaios de capilaridade e tempo em aberto das argamassas com pó de pedra.....	26
Figura 6 – Resultados dos ensaios de capilaridade e tempo em aberto das argamassas com pó de pedra.....	27
Figura 7 – Resultados dos ensaios de capilaridade e tempo em aberto das argamassas com pó de pedra.....	28
Figura 8 – Resistência à tração	29
Figura 9 - Etapas da pesquisa.....	32
Figura 10 - Sistemas de peneiramento.....	35
Figura 11 – Curva Granulométrica da areia.....	36
Figura 12 – Pesagem do pó de pedra.	38
Figura 13 – Curva granulométrica do pó de pedra.....	39
Figura 14 – Ensaio de consistência da argamassa.....	41
Figura 15 – Ensaio de consistência da argamassa.....	42
Figura 16 – Preparação para o ensaio de resistência à compressão.....	44
Figura 17 - Espectro de FRX do pó de pedra.	49
Figura 18 – Espectro de FRX da argamassa de referência (1:1:6).....	50
Figura 19 – Espectro de FRX da argamassa com substituição de 10% de cimento (0,9:1:6:0,1).	51
Figura 20 - Espectro de FRX da argamassa com substituição de 10% de da areia (1:1:5,4:0,6).	52
Figura 21 – Espectro de FRX da argamassa com Adição de 10% da pó de pedra (1:1:6:0,1).	53

Figura 22 – Resultados do ensaio de flow table – Índice de consistência	55
Figura 23 – Densidade de massa	56
Figura 24 – Teor de ar incorporado.....	57
Figura 25 - Gráfico das médias de resistência.....	59
Figura 26 - Gráfico das médias de resistência.....	61
Figura 27 – Resistência à tração	62
Figura 28 – Absorção por capilaridade REF.....	65
Figura 29 – Absorção por capilaridade APP.....	65
Figura 30 – Absorção por capilaridade SARE	66
Figura 31 – Absorção por capilaridade SCIM.....	67
Figura 32 – Absorção por capilaridade SCAL	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características químicas do cimento.	34
Tabela 2 - Características físicas e mecânicas do cimento.	34
Tabela 3 – Caracterização do cimento.	34
Tabela 4 – Resumo do peneiramento para ensaio de granulometria da areia.	36
Tabela 5 - Caracterização da areia.	37
Tabela 6 – Caracterização da Cal.	37
Tabela 7 – Caracterização do pó de pedra.	39
Tabela 8 - Caracterização dos traços.	48
Tabela 9 – Composição química do pó de pedra.	48
Tabela 10 – Composição química da argamassa de referência (1:1:6).	50
Tabela 11 - Composição química da argamassa com substituição de 10% de cimento (0,9:1:6:0,1).	51
Tabela 12 - Composição química da argamassa com substituição de 10% da areia (1:1:5,4:0,6).	52
Tabela 13 – Composição química da argamassa com Adição de 10% da pó de pedra (1:1:6:0,1).	53
Tabela 14 - Caracterização dos traços.	54
Tabela 15 – Densidade de massa das argamassas	56
Tabela 16 – Resistência das argamassas	58
Tabela 17 – Resistência das argamassas	60
Tabela 18 – Resistência das argamassas	62
Tabela 19 – Resistência das argamassas	63
Tabela 20 – Valores médios de absorção por capilaridade	68

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Densidade de massa.....	42
Equação 2 – Teor de ar incorporado	42
Equação 3 – Densidade de massa teórica	43
Equação 4 – Absorção de água por capilaridade.....	45
Equação 5 – Absorção de água por capilaridade.....	46
Equação 6 – Absorção de água por capilaridade.....	46

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivos	17
1.1.1	<i>Objetivo geral</i>	17
1.1.2	<i>Objetivos específicos</i>	17
1.1.3	<i>Estrutura do trabalho</i>	18
2	REFERENCIAL TEÓRICO	20
2.1	Geração de resíduos sólidos	20
2.2	Incorporação de resíduos em argamassas	22
2.3	Argamassas com resíduos de pó de pedra (RPP)	25
2.4	Utilização das argamassas	26
2.5	Substituição de resíduos com teores de 10%	29
3	METODOLOGIA	31
3.1.1	Cimento	33
3.1.2	Areia	35
3.1.3	Cal hidratada	37
3.1.4	Resíduo de pó de pedra	38
3.2	Ensaio realizados	39
3.2.1	<i>Caracterização dos ensaios microestruturais</i>	40
3.2.1.1	<i>Fluorescência de Raios-X (FRX)</i>	40
3.2.2	<i>Caracterização das argamassas no estado fresco</i>	40
3.2.2.1	<i>Índice de consistência (flow table)</i>	40
3.2.2.2	<i>Densidade de massa e teor de ar incorporado</i>	41
3.2.3	<i>Caracterização das argamassas no estado endurecido</i>	43
3.2.3.1	<i>Resistência à compressão</i>	43

3.2.3.2 Resistência à tração na flexão	44
3.2.3.3 Ensaio de absorção por capilaridade	45
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
4.1 Análises microestruturais do material	48
4.1.1 Ensaio de Fluorescência de Raios-X	48
4.2 Argamassas no estado fresco	54
4.2.1 Flow table	54
4.2.2 Densidade de massa	55
4.2.3 Teor de ar incorporado	57
4.3 Argamassas no estado endurecido	58
4.3.1 Ensaio de resistência à compressão corpos de prova cilíndricos	58
4.3.2 Ensaio de resistência à compressão (corpos de prova prismáticos)	60
4.3.3 Ensaio de resistência à tração na flexão	61
4.3.4 Ensaio de absorção capilar	64
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	70
5.1 Sugestões de trabalhos futuros	71

Capítulo 1

1 INTRODUÇÃO

Diante do crescimento populacional e globalização, a construção tem buscado inovações tecnológicas de otimização dos processos construtivos com redução de resíduos sólidos. De acordo com pesquisa feita pelas Nações Unidas, as populações estão no centro do desenvolvimento sustentável para a realização da Agenda 2030 (MUKRIMAA et al., 2016), contribuindo para que a mitigação na geração dos resíduos sólidos seja praticada globalmente. Segundo Farias (2019), as atividades relacionadas a construção civil conseguissem reciclar 98% dos resíduos sólidos em um ano, o volume auxiliaria na construção de 2134 estádios de futebol do porte do Maracanã.

De acordo com a resolução N° 307 do CONAMA (2002), a classificação dos resíduos da construção civil está distribuída em quatro classes de “A” à “D”, onde a Classe A são os resíduos que podem ser reciclados como agregados; Classe B resíduos de plásticos, papeis/papelão, vidros, entre outros; Classe C para materiais nos quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação, como os produtos oriundos do gesso e Classe D para resíduos de materiais inflamáveis, como tintas, solventes, entre outros.

Considerando que o crescimento das cidades está diretamente ligado a elevação do consumo de concreto e seus insumos, eleva-se a necessidade de extração de recursos naturais, como areia, materiais para a produção dos cimentos, cal e agregados graúdos como a brita. A extração destes materiais traz diversos problemas ambientais, como o comprometimento dos cursos dos rios, acarretando um aumento de vazão e acelerando o processo de degradação das margens, entre outros.

Além dos problemas ambientais supracitados, a geração dos resíduos é um dos grandes problemas das indústrias de extração de pedra britada, sobretudo por um resíduo significativamente pulverulento e pouco explorado na construção civil, muito em função do seu baixo valor comercial e escassez de pesquisas relacionadas a aplicação do material.

Atualmente o pó de pedra tem sido utilizado como agregado miúdo em concretos e as pesquisas apontam um ganho representativo na resistência à compressão do material. Entretanto, em função da sua considerável presença de finos, necessita de uma maior quantidade de água de amassamento, ou seja, relação de água/cimento elevada para a produção do material (BEZERRA *et al.*, 2017).

Outros estudos utilizando o pó de pedra para a material de rejunte em obras de geotecnia apontam que o material apresenta alguns aspectos satisfatórios, mas constatou-se uma maior porosidade em relação o rejuntamento à base de argila. (LIU *et al.*, 2022). Um dos pontos a ser considerado no presente estudo é o formato do grão, pois a estrutura lamelar da argila favorece a melhor ligação entre os agregados, diferentemente do resíduo de pó de pedra que possui uma estrutura esférica melhor definida.

Estudos recentes apontam que a utilização de resíduos de pedra para a produção de argamassas sustentáveis em concentrações acima de 20% a 30% não possuem resultados satisfatórios, considerando que além de aumentar a quantidade de finos, reduzem a trabalhabilidade do concreto (GARG; SHRIVASTAVA, 2023).

Outro fator relevante nas pesquisa estão relacionados a quantidade de água, pois a relação efetiva de água/cimento na composição das proporções é fundamental para a produção das argamassas sustentáveis, visto que a granulometria do pó de pedra demanda uma maior quantidade do fluido para a hidratação do cimento (BOUARROUDJ *et al.*, 2019).

Em consideração ao exposto, a presente pesquisa visa analisar a incorporação do resíduo do pó de pedra para a produção de argamassas na proporção de 10% de substituição da areia, pois a curva granulométrica do material está dentro dos parâmetros normativos da caracterização dos agregados miúdos. Em seguida buscou-se substituir 10% de cimento por pó de pedra, considerando que o cimento é um material poluente durante seu processo de fabricação. O terceiro traço buscou substituir 10% da cal, pois considerou-se que a elevada pulverulência do resíduo poderia substituir o aglomerante aéreo. E por fim, a adição global de 10% de areia às massas totais da proporção.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo geral analisar o comportamento de um conjunto de materiais cimentícios com a substituição parcial de 10% da massa de cimento, cal hidratada e areia por pó de pedra, resíduo gerado durante o processo de britagem dos agregados graúdos nas pedreiras. Adicionalmente, pretende-se avaliar os efeitos da adição de 10% desse tipo de resíduo na matriz cimentícia.

1.1.2 Objetivos específicos

A fim de se atingir o objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Dosagem de um conjunto de matrizes cimentícias para a incorporação do resíduo de pó de pedra;
- Preparação e caracterização de corpos de prova dos sistemas projetados;
- Analisar as propriedades das matrizes cimentícias considerando o estado fresco e endurecido;
- Investigar o comportamento químico, estrutural e mecânico dos compósitos cimentícios aditivados com o resíduo das pedreiras;
- Comparar as propriedades físicas e químicas das matrizes cimentícias;
- Identificar aplicações práticas para as argamassas compostas por resíduos.

1.1.3 Estrutura do trabalho

A presente pesquisa está estruturada em 5 capítulos que abrangem todas as etapas do desenvolvimento do projeto. Em detalhes:

O Capítulo 1 é composto pela introdução, onde conta com um breve histórico sobre a temática, tal como os objetivos gerais e específicos e a estrutura da pesquisa.

Seguindo para o Capítulo 2, encontra-se a revisão bibliográfica onde contemplam a geração de resíduos sólidos, utilização do pó de pedra, caracterizações atuais sobre o resíduo, métodos de ensaio das argamassas, propriedades das argamassas, influência dos resíduos do pó de pedra nas argamassas, Aspecto de viabilidade técnica e algumas aplicações práticas atuais.

Em relação ao Capítulo 3 apresenta a metodologia aplicada no projeto, onde apresentam os tipos de ensaios realizados, caracterização dos materiais, definição das caracterizações químicas e mecânicas.

O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos com a utilização do resíduo na produção das argamassas, considerando os ensaios no estado fresco, endurecido e análises microestruturais.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões da presente pesquisa, considerando os resultados obtidos com o uso do resíduo na produção de argamassas.

Capítulo 2

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A construção civil é um dos seguimentos econômicos mais importantes para o desenvolvimento de um país, seja na melhoria e bem estar da população, mas também em melhorias diretas no Produto Interno Bruto (PIB), geração de empregos, avanços tecnológicos, atração de investidores externos e benefícios atrelados a infraestrutura dos equipamentos públicos.

De acordo com Sousa (2015), os grandes programas de liberação de crédito para financiamento habitacional influenciam diretamente no PIB brasileiro, aquecendo o mercado da construção civil no país. Em contrapartida, o avanço das construções traz consigo as grandes extrações de recursos naturais e geração de resíduos sólidos. Ao considerar que o crescimento das cidades está associado ao aumento do consumo de concreto e de suas matérias-primas, eleva-se a necessidade de extração de recursos naturais. Isto inclui recursos como areia, materiais para produção de cimento, cal e agregados grossos como cascalho. A extração destes materiais coloca vários problemas ambientais, como a perturbação dos cursos dos rios, levando ao aumento das vazões e acelerando a degradação das margens dos rios, entre outros problemas. A geração de resíduos é um desafio para a indústria de extração de brita, principalmente devido ao resíduo consideravelmente pulverulento, relativamente pouco explorado no setor da construção, principalmente pelo seu baixo valor comercial e pela escassez de pesquisas relacionadas à sua aplicação.

2.1 Geração de resíduos sólidos

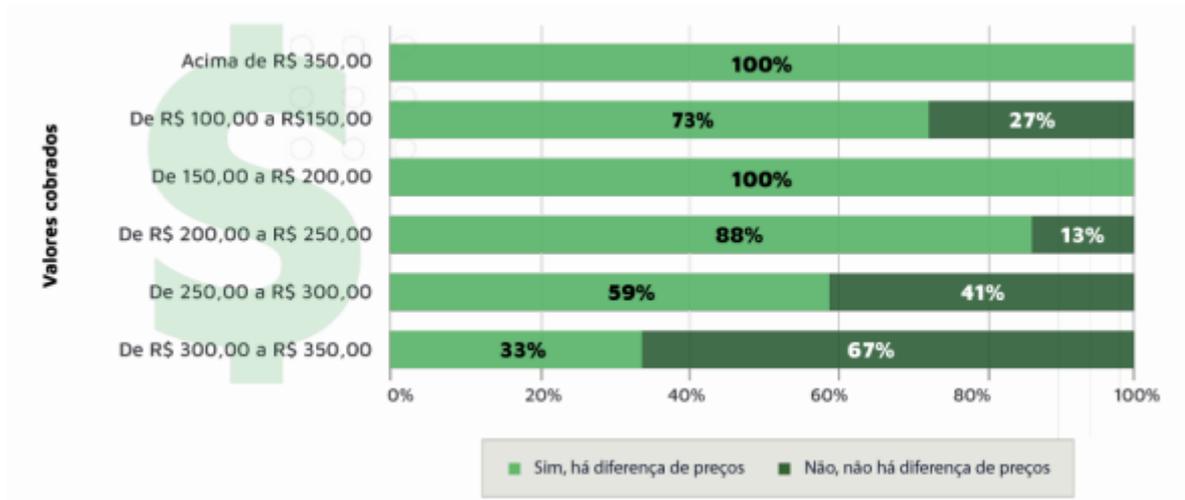
A lei 12.305, que através da Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS) determina as incumbências acerca das falhas no descarte e volume de produção. A lei institui também a responsabilidade compartilhada dos geradores de resíduos, como cidadãos fabricantes, grandes indústrias, comércios varejistas, entre outros. Além disso, a lei aborda objetivos que contribuirão para a eliminação dos grandes lixões, que tanto comprometem o solo e prejudicam o meio ambiente.

De acordo com pesquisa feita pela ABECE (2020), 24% das empresas que coletam as caçambas de resíduos encontram dificuldade para atender as agencias legais, em outras palavras, não aplicam o conjunto de práticas e exigências que mitigam o comprometimento do meio ambiente e poluição dos recursos naturais.

Não somente as grandes construtoras produzem consideráveis volumes de resíduos, mas o somatório de pequenas reformas e demolições, quando mal descartados geram impacto

significativo na produção de resíduos da construção civil (RCC). Um dos resultados da supracitada pesquisa feita pela ABECE (2020), aborda os valores cobrados pelas empresas que alugam as caçambas para o depósito, conforme a figura 01. A pesquisa questionou se havia diferença entre a cobrança dos valores para materiais corrosivos, explosivos, contaminados, entre outros.

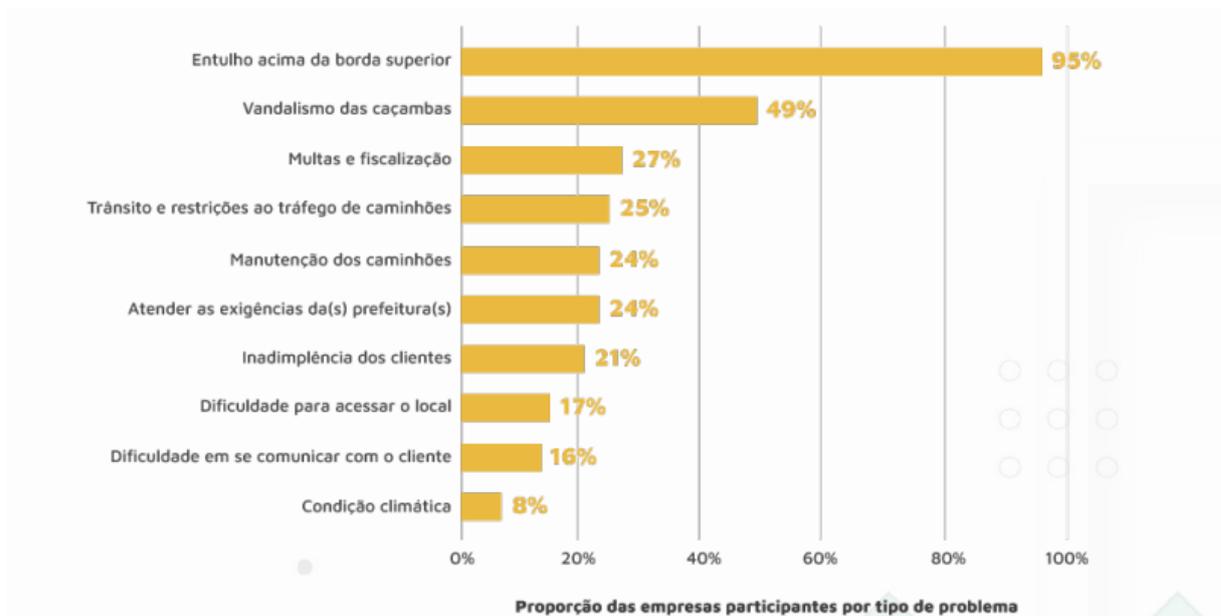
Figura 1 – Preço cobrado pelo aluguel das caçambas



Fonte: ABECE (2020)

Os valores cobrados pelas empresas possuem algumas variações, entretanto, com a elevação do valor do aluguel da caçamba, menos os preços variam de acordo com o material a ser descartado. A pesquisa ainda relata sobre todos os principais problemas encontrados pelas empresas durante a coleta do material, conforme a figura 02.

Figura 2 – Problemas enfrentados pelas empresas de aluguel de caçambas



Fonte: ABECE (2020)

Através da supracitada pesquisa, a ABECE (2020) relata que o processo de reciclagem do RCD precisa de grandes avanços nos grandes centros do Brasil, visto que não há empresa suficientes para atender a demanda de geração de descarte.

A fim de parametrizar e classificar os resíduos, o CONAMA (2002), segregou os resíduos em quatro partes, de “A” a “D”, e, determinou que a Classe A são os materiais são os resíduos que podem ser reciclados como agregados; Classe B resíduos de plásticos, papéis/papelão, vidros, entre outros; Classe C para materiais nos quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação, como os produtos oriundos do gesso e Classe D para resíduos de materiais inflamáveis, como tintas, solventes, entre outros.

A metodologia BIM (*Building Information Modeling*) tem auxiliado a gestão de projetos no processo de mitigação dos resíduos sólido, trazendo construções ágeis, duráveis e com baixos teores de geração de resíduos. De acordo com Caldas (2020), a ferramenta possibilitou identificar que cerca de 10% de RCC gerado são da Classe B, e 90% da classe A e tem as argamassas como principal resíduo desperdiçado com 56% do volume total.

2.2 Incorporação de resíduos em argamassas

Atualmente, tem se intensificado as pesquisas relacionadas ao uso de resíduos incorporado nas argamassas, como o uso de resíduos cinzas, resíduos de ACM, materiais poliméricos, fibras vegetais, casca crustáceos, fibras de vidro, entre outros tipos de resíduos sólidos.

De acordo com Navarini Kurz (2018), o uso de borracha nas argamassas reduziu a resistência à compressão, mas trouxe outras propriedades importantes, como a redução da absorção por capilaridade, caracterizando uma argamassa com potenciais características na prevenção e tratamento de manifestações patológicas relacionadas a umidade ascendente.

Uma estratégia interessante é a incorporação de resíduos sólidos em materiais de construção como concreto e argamassa. Conforme relatado, ((O’FARRELL; SABIR; WILD, 2006; OLOFINNADE *et al.*, 2016; NACERI; HAMINA, 2009; LIN *et al.*, 2010), resultados satisfatórios foram obtidos para resíduos de blocos cerâmicos na produção de concreto. Granitos e mármore também se destacam por reaproveitá-los na produção de argamassas melhorando a resistência à compressão e à flexão dos materiais cimentícios (SANTOS; LIRA; RIBEIRO, 2013). Um dos grandes desafios no aproveitamento da produção de resíduos de

materiais de construção é a alta porosidade do material, que aumenta a absorção de água e reduz a resistência mecânica. (ABBAS *et al.*, 2009; AGHILLOTF; PALASSI; RAMEZANIANPOUR, 2021; BELTRÁN *et al.*, 2014; BUTLER; WEST; TIGHE, 2012; CORINALDESI, 2010; ALDUCIN-OCHOA *et al.*, 2021; TURI GERIN; SALES; DE NARDIN, 2020; GÜNEYISI *et al.*, 2016; HANIF *et al.*, 2017; KAPOOR; SINGH; SINGH, 2016; KHOURY *et al.*, 2018; LIU; XIAO; SUN, 2011; MOHAMMED; NAJIM, 2020; PACHECO *et al.*, 2019; PICKEL; TIGHE; WEST, 2017; VERIAN; ASHRAF; CAO, 2018; ROESLER *et al.*, 2013; SALGADO; SILVA, 2021; THOMAS; THAICKAVIL; WILSON, 2018; ZHAO *et al.*, 2020; XIAO *et al.*, 2013). Materiais alternativos, como as fibras, têm sido amplamente utilizados na reciclagem de resíduos, promovendo aumento na resistência à tração das argamassas (ALI *et al.*, 2021; KANNAM; RAO SARELLA; KUMAR PANCHARATHI, 2018; QURESHI; ALI; ALI, 2020; SU, 2020);

Em particular, os resíduos de pedra têm sido utilizados como agregados finos no concreto, e pesquisas indicam um aumento na resistência à compressão do material. Porém, sua considerável quantidade de finos exige maior teor de água de mistura, significando elevada relação água/cimento para produção do material (BEZERRA *et al.*, 2017). Outros estudos empregando resíduos de pedra como material de graute em projetos geotécnicos sugerem que o material apresenta alguns aspectos satisfatórios, porém foi observada maior porosidade que o graute à base de argila (LIU *et al.*, 2022). Um dos aspectos a considerar no presente trabalho é a forma do grão, pois a estrutura lamelar da argila promove uma melhor ligação entre agregados e resíduos de pó de pedra, que apresenta uma estrutura esférica mais bem definida.

Estudos recentes revelam que o uso de resíduos de pedra para produção sustentável de argamassas em concentrações acima de 20% a 30% levou a resultados insatisfatórios, pois não só aumenta o teor de finos como reduz a trabalhabilidade do concreto (GARG; SHRIVASTAVA, 2023; BELTRÁN *et al.*, 2014). Contudo, níveis de substituição superiores a 30% de agregados na produção de concreto reduzem a resistência à compressão do material. (BELTRÁN *et al.*, 2014; ETXEBERRIA *et al.*, 2007; GHONEIM *et al.*, 2020; THOMAS; THAICKAVIL; WILSON, 2018; VERIAN; ASHRAF; CAO, 2018; XIAO *et al.*, 2019).

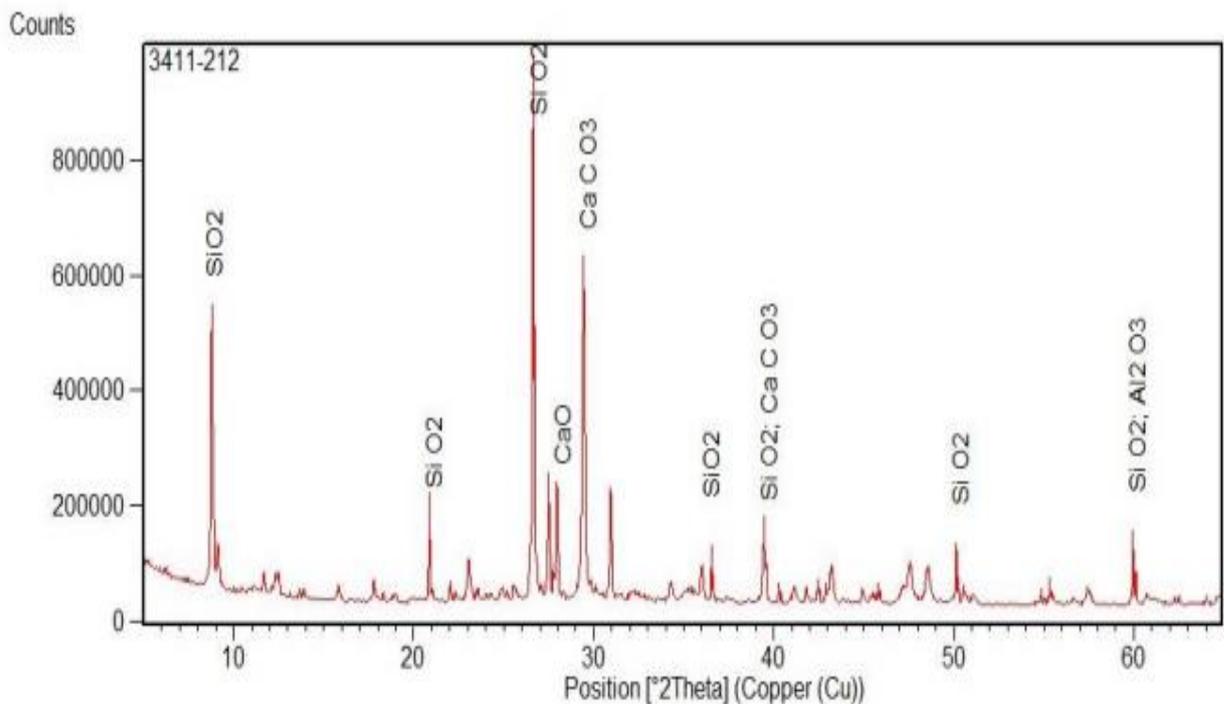
Outras pesquisas têm sido desenvolvidas com a substituição do vidro nas argamassas, que relatam benefícios para argamassas submetidas a elevadas temperaturas. De acordo com Moser (2019), a inserção do pó de vidro nas argamassas trazem diversos benefícios para as propriedades físicas e químicas, como o aumento da resistência à compressão em temperatura ambiente e elevadas temperaturas.

Em relação a utilização de fibras naturais para a confecção das argamassas, pesquisas apontam que a utilização de biofibras de curauá, planta nativa da região amazônica, concede às argamassas propriedades flexíveis, como melhorias na tenacidade e resistência à tração. Além disso, observou-se que após o início da fissuração, as fibras auxiliaram as argamassas na capacidade de suporte, promovendo características de resistência à tração ao compósito cimentício. (PIMENTEL *et al.*, 2016).

O uso de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) tem sido cada vez mais explorado na produção de compósitos cimentícios. Alguns resultados apontam que o uso de RCD em argamassas aumentou a absorção capilar, a porcentagem de absorção por imersão e índice de vazios. Entretanto, o resíduo contribuiu para a produção de argamassas com consideráveis resistências mecânicas, aderência na flexão e tração (LIMA, 2022).

Ainda de acordo com Lima (2022), o uso de resíduos cimentícios incrementa fases cristalinas importantes na composição do material, como a presença de Quartzo (SiO_2), Óxido de Cálcio (CaO), Alumina (Al_2O_3) e Calcita (CaCO_3), conforme a difração Raios-X apresentada na figura 3.

Figura 3 – Difração de Raio-X argamassas com RCD



Fonte: Lima (2019)

2.3 Argamassas com resíduos de pó de pedra (RPP)

O resíduo de pó de pedras tem sido utilizado para a produção de diversos materiais, como argamassas autoadensáveis, concreto, reforços em estruturas geotécnicas, pavimentação, estruturas pré-moldadas, entre outros. De acordo com Duarte (2022), o uso do pó de pedras na substituição por agregado miúdo comum para a produção da argamassas autoadensáveis, traz diversos benefícios para o material, como a melhoria na resistência mecânica, menor consumo de cimento e água, em função do elevado módulo de finura do material, tal como melhorias na fluidez do compósito em substituições de 75% do resíduo com agregado miúdo comum, conforme figura 04.

Figura 4 – Características das argamassas com resíduo de pó de pedra

Composição	a/c (kg/kg)	Fluidez Diâmetro de abertura (mm)	Densidade de massa (g/cm ³)	Teor de ar incorporado (%)
AR75AB25	0,74	287,8	2,03	6,15
AR50AB50	0,66	300,5	2,07	5,78
AR25AB75	0,55	308,5	2,18	4,11

Fonte: Duarte (2022)

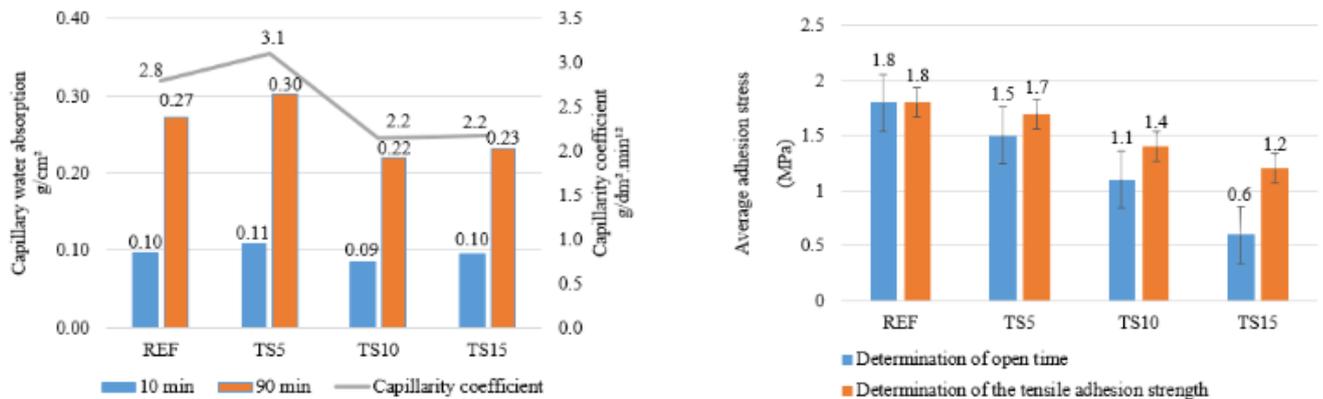
Considerando que o cimento durante o seu processo de produção libera muitos gases que prejudicam o meio ambiente, Nobrega *et al.* (2015) realizou uma pesquisa acerca da substituição parcial da massa de cimento por RPP. Os resultados demonstram que a resistência mecânica do material reduziu proporcionalmente a redução da massa de cimento e aumento da quantidade de resíduo, assim como o aumento da absorção após a adição de 20% dos resíduos. Entretanto, em relação ao módulo de elasticidade, observou-se que houve uma redução em seus valores em relação a argamassa de referência, cabendo a aplicação prática em revestimentos argamassado, pois uma vez em que as estruturas tem se tornado cada vez mais esbeltas, as argamassas necessitam de um considerável módulo de elasticidade para absorver tais solicitações dinâmicas.

O uso de pó de pedra no concreto tem trazido diversas benfeitorias nas características físicas e químicas do material, seja no estado fresco ou endurecido. Considerando que o pó de pedra tem origem basáltica, a atividade pozolânica do material contribui para a resistência à

compressão e trabalhabilidade do material, haja vista que o resíduo possui em média 13% de finos, material passante pela peneira número #200 (MENOSSEI, 2004).

Pesquisas relacionadas para o uso em argamassas industrializadas também têm sido desenvolvidas, relatando que a quantidade de finos presente no resíduo possibilita um melhor preenchimento dos vazios do material, proporcionando uma argamassa mais densa e com menos vazios. Além disso, obtiveram uma maior retenção de água nas argamassas, possibilitando uma melhor hidratação dos grãos de cimento, tal como a determinação do tempo em aberto das argamassas e resistência à tração, que em relação às proporções de referência demonstraram semelhança em suas propriedades, conforme gráficos da figura 5 (LENTZ; ANTUNES, 2021).

Figura 5 – Resultados dos ensaios de capilaridade e tempo em aberto das argamassas com pó de pedra



Fonte: Lentz e Antunes (2021)

Um fator relevante da presente pesquisa é a mudança de parâmetros para proporções de substituição acima de 10%, onde todos os requisitos técnicos relacionados ao estado fresco, endurecido e químicos sofrem alterações consideráveis. Então, a substituição de 10% torna-se uma alternativa viável, haja vista que teremos um material com as mesmas características e quantidade representativa de resíduo.

2.4 Utilização das argamassas

Existe um vasto campo de aplicação das argamassas, seja para a regularização de alvenarias, revestimentos, reparos estruturais, assentamento de blocos e revestimentos cerâmicos, entre outros.

De acordo com Santiago (2007), as argamassas possuem algumas propriedades importantes, como:

- Compacidade, pois argamassas mais compactas, tendem a ser mais densas e conseqüentemente mais resistentes;
- Volume constante, considerando que caso algum material calcário, como a cal hidratada ou cimento não seja submetido ao processo de queima total durante a fabricação, na etapa de hidratação da argamassa este composto reagirá com a água, provocando anomalias no revestimento;
- Impermeabilidade, sendo essa uma das principais características, visto que os revestimentos argamassados, de forma geral, servem de proteção para as estruturas de concreto e que devem bloquear a entrada de umidade para os elementos estruturais, considerando que a água serve de eletrólito para a corrosão eletroquímica das armaduras;
- Aderência ao substrato, propriedade muito importante para as argamassas, haja vista que uma boa aderência do revestimento argamassado é garantia de bom desempenho do material, visto que o conjunto terá uma boa união, trabalhando conjuntamente nas solicitações dinâmicas, conforme a Figura 6.

Figura 6 – Resultados dos ensaios de capilaridade e tempo em aberto das argamassas com pó de pedra



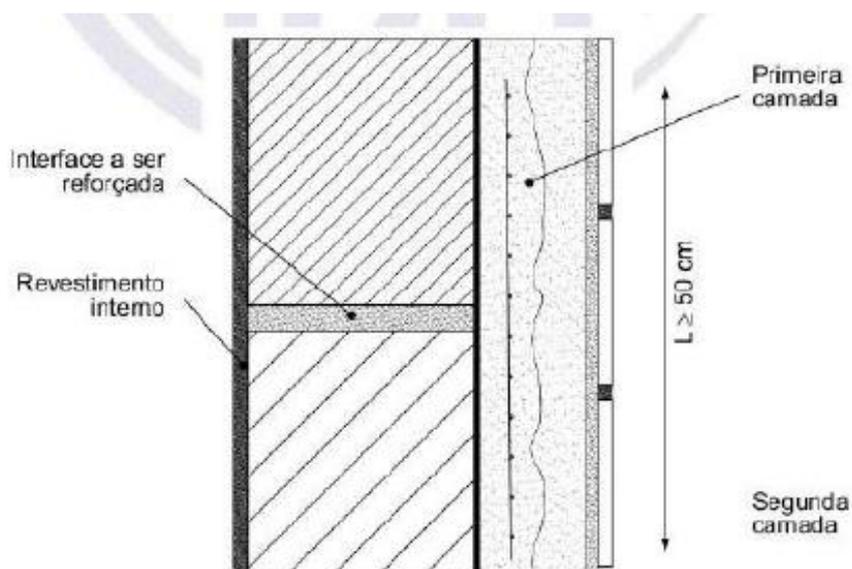
Fonte: Autor

Dentre todas as características, as argamassas podem ser utilizadas nos mais diversos campos de aplicação, como pode ser exemplificado por Kanan (2008), onde distribui as argamassas em três categorias:

- Argamassas de assentamento cerâmico e elevação das alvenarias, fundações, pisos, cobertas, camadas de regularização, entre outras. Em relação a elevação das alvenarias, a argamassa desempenha papéis fundamentais no processo executivo, uma vez que é responsável pela união entre os blocos cerâmicos e absorção das tensões solicitantes no material;
- Argamassas destinadas ao revestimento, como nas fachadas, rebocos, rejuntas e acabamentos em geral. Dados materiais são responsáveis por proteger as estruturas contra as intempéries, mitigando o processo de degradação das estruturas;
- Argamassas decorativas, como sendo os materiais utilizados para esculturas, materiais esculpidos, moldados, que oferecem uma excelente qualidade de acabamento.

Em relação a aplicação dos revestimentos em fachadas, a NBR 13755 (ABNT, 2017) determina todos os parâmetros para a aplicação em revestimentos cerâmicos na área externa e a argamassa de emboço é um dos componentes importantes no sistema de fachadas. A supracitada norma regulamentadora determina que a espessura mínima é de 20 mm e a máxima de 50 mm. Mas caso a camada seja superior ao máximo recomendado, deve-se prever o reforço com telas entre camadas de 40 mm, limitada a 80 mm do revestimento, conforme a figura 7.

Figura 7 – Resultados dos ensaios de capilaridade e tempo em aberto das argamassas com pó de pedra

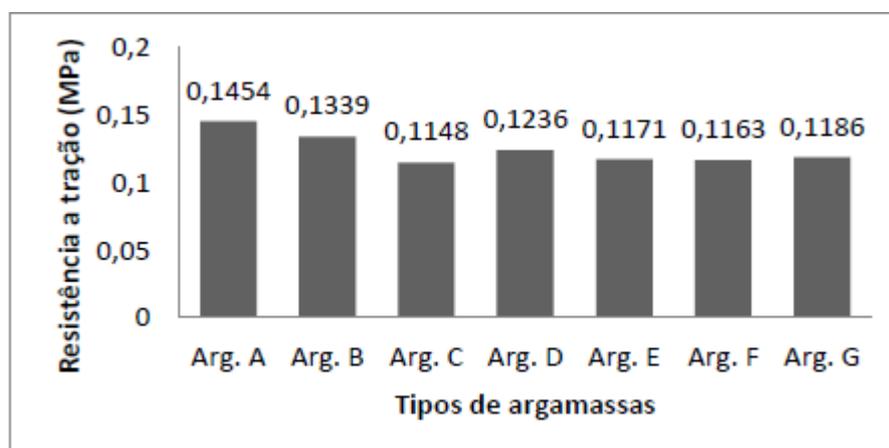


2.5 Substituição de resíduos com teores de 10%

Atualmente, diversos estudos investigam a substituição de componentes em argamassas com uma ampla gama de materiais, incluindo resíduos de granito, pó de borracha, pó de vidro, materiais poliméricos, cerâmicos e fibras vegetais. Pesquisas indicam que a substituição de 10% desses materiais pode resultar em melhorias significativas nas propriedades das argamassas, além de oferecer vantagens econômicas. Estudos mostraram que a incorporação de resíduos de granito em 10% aumentou a resistência à compressão. De mesmo modo, que o uso de pó de borracha em teores similares contribuiu para a melhoria da flexibilidade das argamassas. Esses achados corroboram a viabilidade técnica e econômica da substituição parcial em argamassas, promovendo a sustentabilidade na construção civil. Existe um vasto campo de aplicação das argamassas, seja para a regularização de alvenarias, revestimentos, reparos estruturais, assentamento de blocos e revestimentos cerâmicos, entre outros (STREB; GAUER, 2022; MENEZES *et al.*, 2020; GOMES *et al.*, 2020).

De acordo com Menezes (2020), Foi verificado que as argamassas com a incorporação de 10% de resíduo de corte de mármore e granito, apresentaram um aumento de 21,1% na resistência à compressão após 28 dias de cura. Ainda mais impressionante, após apenas sete dias de cura, a resistência aumentou em 35,51%. Esses resultados indicam que a adição de não só melhora a resistência mecânica das argamassas a longo prazo, mas também proporciona benefícios substanciais em um período mais curto, tornando a prática vantajosa para aplicações que requerem rápido desenvolvimento de resistência.

Figura 8 – Resistência à tração



Fonte: Menezes (2020)

Capítulo 3

3 METODOLOGIA

O presente capítulo descreve as 7 etapas da pesquisa, distribuídos em 3 categorias analíticas denominadas como “caracterizações dos materiais e dosagens”, “métodos de ensaios do estado fresco e endurecido” e “ensaios microestruturais”, conforme a Figura 09.

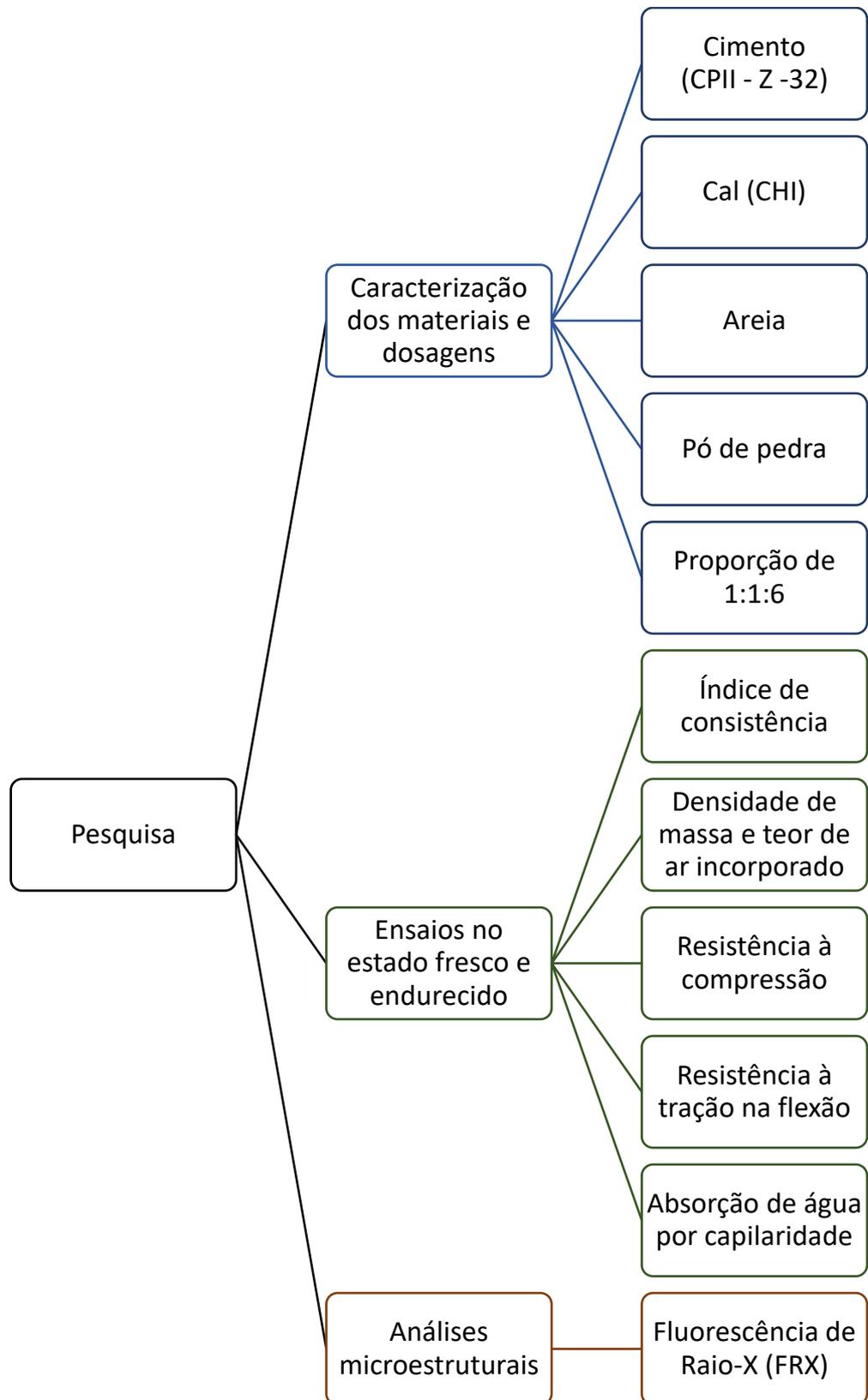
A primeira etapa confere a caracterização dos materiais, como o tipo de cimento utilizado, areia e suas respectivas propriedades, cal hidratada e água empregada nas argamassas. Em seguida, a segunda etapa aborda as caracterizações relativas ao resíduo de pó de pedra utilizado, como determinação de curva granulométrica, propriedades físicas do material e extração. A terceira etapa relata o método de dosagem adotado, referente as proporções utilizadas, tal como parâmetros normativos e pesquisas vigentes.

Após as caracterizações, a quarta etapa relata o método de moldagem dos corpos de prova (CP's) e ensaios no estado fresco e endurecido, como índices de consistência (*flow table*), densidade de massa, teor de ar incorporado, resistência à compressão simples e resistência à compressão na flexão.

A quinta etapa compreende as caracterizações microestruturais dos materiais, onde foi realizado o ensaio de Fluorescência de Raios-X (FRX), onde será compreendida as particularidades das interações microestruturais do resíduo com os demais componentes da argamassa.

Por fim, a sexta etapa compreende a análise e interpretação dos resultados obtidos, objetivando as correlações entre as características dos materiais, dosagens, ensaios no estado fresco, endurecido e composições microestruturais dos produtos, tal como sugestões de aplicações na engenharia civil.

Figura 9 - Etapas da pesquisa.



Fonte: Autor (2023)

Conforme demonstrado nas etapas supracitadas na Figura 08, o planejamento experimental objetivou, inicialmente, caracterizar todos os materiais constituintes na produção das argamassas, parametrizar as proporções de dosagens para as substituições de 10% da massa cimentícia, cal e areia por pó de pedra, e, adição de 10% do resíduo à proporção de 1:1:6 (cimento, cal e areia), proporção de argamassa recomendado para a aplicação de emboço e assentamento de alvenarias.

3.1 Caracterizações dos materiais e dosagens

Considerando que um dos objetivos da pesquisa é utilizar materiais que possam ser adquiridos com facilidade no mercado, optou-se pela utilização do cimento classe II com adição de pozolana e resistência de 32 Mpa (CPII – Z – 32), areia fina, conhecida como “areia de fingir” e cal hidratada do tipo I (CHI).

Inicialmente utilizou-se areia grossa, conhecida como “areia lavada”, entretanto o material coletado possuía muitos finos incorporados na sua composição, o que demandou a necessidade de elevar a quantidade de água na argamassa, pois o índice de consistência não foi satisfatório. Sabendo que o aumento da relação água-cimento reduz a resistência do material e aumenta a porosidade, optou-se pela substituição do material por um agregado miúdo de melhor qualidade.

3.1.1 Cimento

O cimento utilizado para a produção das argamassas foi o CPII – Z – 32, composto por adição de pozolana que varia de 6% à 14% de sua massa, reduzindo a permeabilidade do material. Além da pozolana, o CPII – Z pode ter adição de materiais carbonáticos, como o filler calcário no limite de 15% em massa, conforme a recomendação da NBR 16.697 (TÉCNICAS, 2018). O uso da pozolana no composto cimentício aumenta a resistência à compressão e reduz a permeabilidade em função da formação do silicato de cálcio hidratado (C-S-H) (ABBAS, 2018).

A ABNT (2018), através da NBR 16.697, determina os parâmetros relativos ao cimento, como sua composição química, propriedades físicas, tempo de pega, entre outros requisitos imprescindíveis para o material. A Tabela 01 os intervalos de referência para o cimento utilizado na pesquisa.

Tabela 1 - Características químicas do cimento.

Designação normalizada	Sigla	Classe de resistência	Sufixo	Clínquer + sulfatos de cálcio	Escória granulada de alto-forno	Material pozzolânico	Material carbonático
Cimento Portland composto com material pozzolânico	CP II-Z	32	-	71% - 94%	0%	6% - 14%	0% - 15%

Sigla	Resíduo insolúvel (RI)	Perda ao fogo (PF)	Óxido de magnésio (MgO)	Trióxido de enxofre (SO ₃)
CP II-Z	≤ 18,5	≤ 8,5	-	≤ 4,5

Fonte: ABNT NBR 16.697 (2018) – adaptado pelo autor

As propriedades químicas influenciam diretamente nas características físicas e mecânicas do cimento, como o exemplo da pozzolana que reduz a porosidade da pasta e o clínquer, composto por materiais que quando reagem com a água determinam a resistência e alcalinidade do material. Sendo assim, a supracitada norma aborda alguns parâmetros físicos acerca do material, constantes na tabela 02

Tabela 2 - Características físicas e mecânicas do cimento.

Sigla	Classe	Finura	Tempo de início de pega (min)	Expansibilidade a quente (mm)	Resistência à compressão (MPa)				Índice de brancura
		Resíduo na peneira 75 µm (%)			1	3	7	28	
CP II-Z	32	≤12,0	≥ 60	≤5	-	≥10,0	≥ 20,0	≥ 32,0	-

Fonte: ABNT NBR 16.697 (2018) – adaptado pelo autor

Com objetivo de parametrizar os requisitos do cimento utilizado na elaboração da pesquisa, solicitou-se ao fabricante os ensaios realizados pela indústria para análise dos parâmetros. A tabela 03 relata os resultados dos ensaios realizados pelo fabricante.

Tabela 3 – Caracterização do cimento.

Data da realização do ensaio	Finura		Blaine cm ² / g	Água de consist. (%)	Tempo de pega		Expansibilidade a quente (mm)	Resistência à compressão (Mpa)		
	# 200	#325			início (min)	Fim (min)		3 dias	7 Dias	28 Dias
	≤ 12,0	N/A	≥ 2600	N/A	≥ 60	≤ 600	≤ 5,0	≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0
14/09/2022	0,2	308	5205	29,2	242	310	0,0	25,1	32,2	38,6
Mínimo	0,2	3,1	5200	28,8	220	290	0,0	21,2	27,3	35,7
Máximo	0,5	4,6	5590	29,6	265	330	0,5	25,2	32,1	39,6

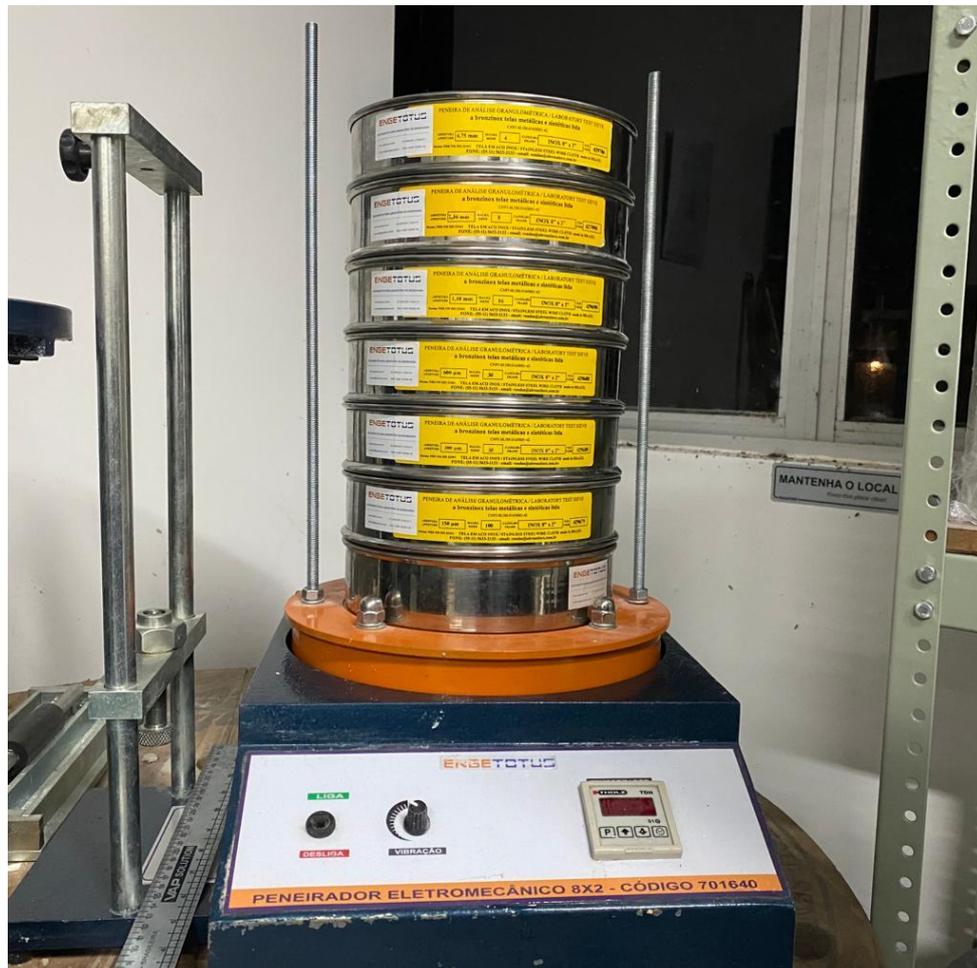
Fonte: Fabricante (2023)

3.1.2 Areia

Para a elaboração das argamassa de emboço utilizou-se areia fina, seguindo todos os parâmetros de utilização e caracterização recomendadas pela da NBR NM 248 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003a). Durante a escolha do material, inicialmente, foi realizada uma avaliação tátil visual da areia, a fim de avaliar a qualidade do material. Em seguida, o material foi coletado e destinado a estufa, onde passou pelo processo de secagem por 24 horas a temperatura de 100°C.

Após a secagem do material, a NBR NM 248 determina que para granulometrias menores que 4,75 mm devem ser coletados 300 gramas de material e repetir o peneiramento duas vezes para uma melhor caracterização do material. As peneiras utilizadas foram da série normal, seguindo a ordem decrescente de 4,75 > 2,36 > 1,18 > 600 > 300 > 150 > 75, conforme a Figura 10, sendo peneiradas mecanicamente pelo período de 2 minutos (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003a).

Figura 10 - Sistemas de peneiramento.



Fonte: Autor

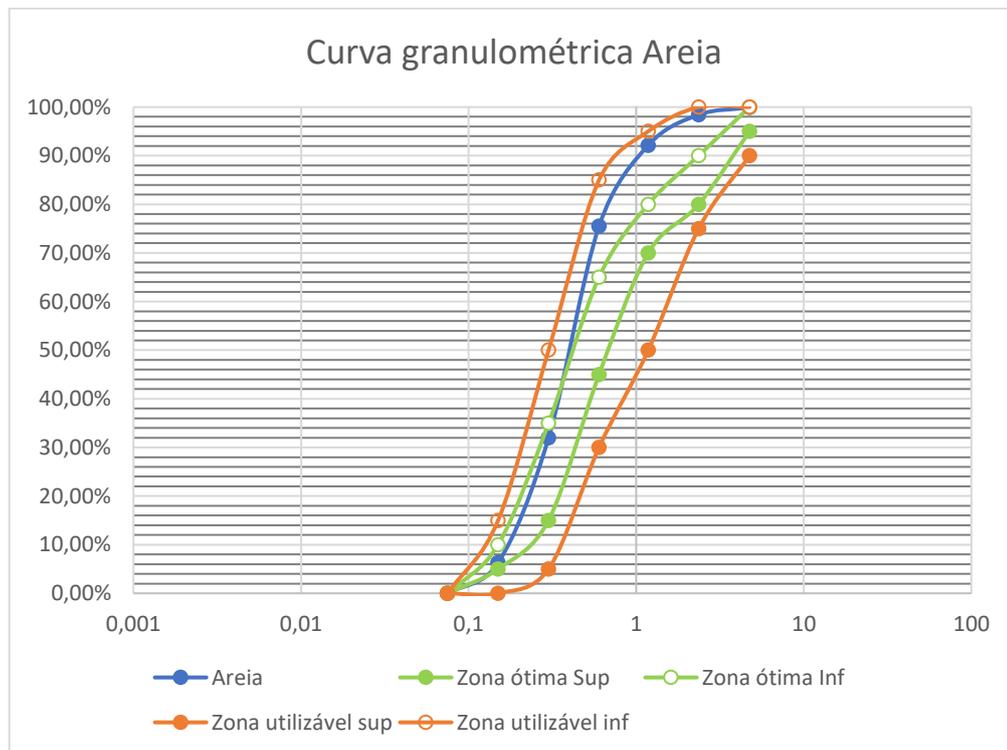
A etapa seguinte consistiu em pesar as frações retidas em cada peneira, com auxílio da balança de precisão, onde foram obtidos os dados da curva granulométrica, módulo de finura e dimensão máxima característica, conforme a Tabela 4 e gráfico da Figura 11.

Tabela 4 – Resumo do peneiramento para ensaio de granulometria da areia.

Peneiras	Amostra A (g)	% retida amostra A	Amostra B (g)	% retida amostra B	Média (%)	% acumulada	Areia	Zona ótima Sup	Zona ótima Inf	Zona utilizável sup	Zona utilizável inf
4,75	0,5	0,17%	0	0,00%	0,08%	0,08%	99,92%	95%	100%	90%	100%
2,36	4	1,34%	5	1,68%	1,51%	1,59%	98,41%	80%	90%	75%	100%
1,18	16,5	5,52%	21	7,04%	6,28%	7,87%	92,13%	70%	80%	50%	95%
0,600	52,5	17,56%	47	15,75%	16,65%	24,52%	75,48%	45%	65%	30%	85%
0,300	140,5	46,99%	119,5	40,03%	43,51%	68,03%	31,97%	15%	35%	5%	50%
0,150	73,5	24,58%	80	26,80%	25,69%	93,72%	6,28%	5%	10%	0%	15%
0,075	11,5	3,85%	26	8,71%	6,28%	100,00%	0,00%	0%	0%	0%	0%

Fonte: Fabricante (2023)

Figura 11 – Curva Granulométrica da areia.



Fonte: Autor

Considerando os dados obtidos e gráfico da curva granulométrica, observa-se que o material possui características dentro da zona utilizável, de acordo com os padrões preconizados pela NBR NM 248 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003a). Sendo assim, pôde-se dimensionar os valores dos módulos de finura, dimensão máxima característica, absorção de água, massa específica, massa específica do agregado seco, massa específica saturada da superfície seca e massa unitária do material, de acordo com a Tabela 5.

Tabela 5 - Caracterização da areia.

PROPRIEDADES	RESULTADOS	PARÂMETRO NORMATIVO
Absorção de água (%)	0,072	NBR NM 30
Dimensão máxima característica (mm)	2,36	NBR NM 248
Módulo de finura	1,96	NBR NM 248
Massa específica (g/cm ³)	2,602	NBR NM 52
Massa específica saturada da superfície seca (g/cm ³)	2,611	NBR NM 52
Massa unitária (kg/m ³)	1621	NBR NM 45

Fonte: Autor (2023)

3.1.3 Cal hidratada

Para a escolha da cal, objetivou-se o material mais puro para a incorporação nas argamassas, optando pelo tipo “I”, cuja sigla comercial é CH-I. Material com maior grau de pureza e menos úmida quando relacionada com as demais classes de cales, tal como o atendimento aos requisitos normativos preconizados pela NBR 7175 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003b). Desta forma, a Tabela 6 confere as propriedades físicas e químicas da cal CH-I utilizada no preparo dos materiais.

Tabela 6 – Caracterização da Cal.

Critérios		Resultados	Parâmetros normativos
Perda ao fogo (1.000 ± 50°C)		0,59%	-
Umidade (110 ± 5°C)		22,94%	-
Anidrido Carbônico		2,01% CO ₂	≤7%
Anidrido Sulfúrico		0,12% SO ₃	-
Óxido de Cálcio total		66,90% CaO	-
Óxido de Magnésio		2,96% MgO	-
CaO + MgO não hidratados		4,00%	≤10%
Óxidos totais na base de não voláteis		90,70%	≥90%
Finura (% retida acumulada)	peneira #30 (600 μm)	0,00%	≤0,5
	peneira #200 (75 μm)	1,80%	≤10%

Fonte: Autor (2023)

3.1.4 Resíduo de pó de pedra

O resíduo de pó de pedra foi coletado em uma pedreira localizada na região metropolitana do Recife – Pernambuco. Após a coleta, o material seguiu para a estufa, onde passou pelo processo de secagem de 24 horas à temperatura de 100°C.

Considerando que o presente experimento utilizará o resíduo com adições e substituições dos aglomerantes e agregado miúdo, a caracterização do material seguiu os parâmetros normativos da NBR NM 248. Desta forma, após a secagem na estufa, o material seguiu para a pesagem e classificação das curvas granulométricas, onde foram utilizadas as peneiras seguindo a sequência de 4,75 - 2,36 - 1,18 - 600 - 300 - 150 – 75, com duas porções de resíduos de 300 gramas, realizadas em duas etapas do ensaio, conforme a Figura 12.

Figura 12 – Pesagem do pó de pedra.



Fonte: Autor

Em seguida, o material passou pelo processo de peneiramento mecânico com duração de dois minutos, conforme a recomendação da NBR NM 248 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003a). Por fim, as frações retidas em cada peneira foram pesadas e descritas na Tabela 7.

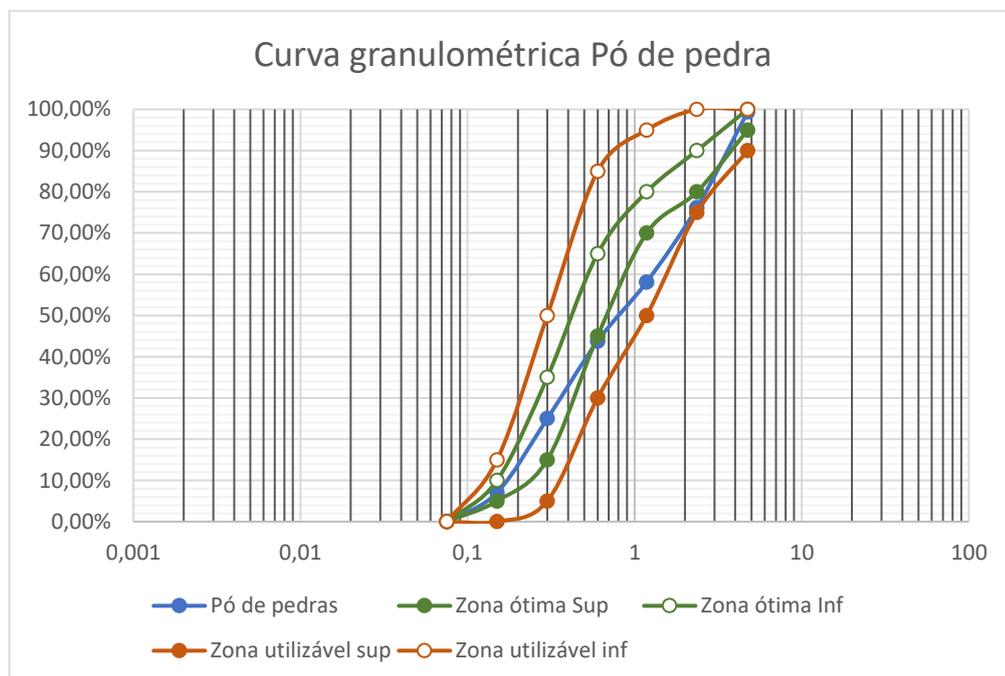
Tabela 7 – Caracterização do pó de pedra.

Peneiras	Amostra A (g)	% retida amostra A	Amostra B (g)	% retida amostra B	Média	% acumulada	Pó de pedra
4,75	1,5	0,50%	2,00	0,67%	0,59%	0,59%	99,41%
2,36	70	23,45%	68,5	23,03%	23,24%	23,83%	76,17%
1,18	50	16,75%	57,5	19,33%	18,04%	41,86%	58,14%
0,600	43,5	14,57%	42	14,12%	14,35%	56,21%	43,79%
0,300	59,5	19,93%	52,5	17,65%	18,79%	75,00%	25,00%
0,150	56,5	18,93%	50,5	16,97%	17,95%	92,95%	7,05%
0,075	17,5	5,86%	24,5	8,24%	7,05%	100,00%	0,00%
Dimensão máxima característica (mm)					4,75	NBR NM 248	
Módulo de finura					2,90	NBR NM 248	

Fonte: Autor (2023)

Após a pesagem, foram traçadas as curvas granulométricas do pó de pedra para avaliação do material. Considerando que o módulo de finura foi de 2,90, a NBR 7211 classifica como estando dentro da zona utilizável superior, conforme pode ser identificado no gráfico da curva granulométrica do resíduo na Figura 13 (ABNT, 2005).

Figura 13 – Curva granulométrica do pó de pedra.



Fonte: Autor

3.2 Ensaios realizados

Os ensaios de caracterização das argamassas foram subdivididos em três etapas, análises microestruturais, caracterizações no estado fresco e estudos sobre o estado endurecido,

processos que conseguem identificar as funcionalidades e comportamento das argamassas em todas as etapas de seu uso, a fim de garantir o melhor comportamento do material.

3.2.1 Caracterização dos ensaios microestruturais

As análises microestruturais auxiliaram a pesquisa no estudo do comportamento e interações químicas entre os materiais. Tais análises favorecem a obtenção de informações valiosas sobre a estrutura interna das argamassas, arranjo dos grãos, fases cristalinas existentes, porosidade dos materiais, composição química, reações dos componentes, entre outros.

3.2.1.1 Fluorescência de Raios-X (FRX)

O ensaio de FRX é uma técnica não destrutiva para determinar a composição de diversos materiais, incluindo os cimentícios. A fluorescência de Raios-X é a interação entre a radiação e os átomos presentes na amostra, pois absorvem essa radiação e os elétrons internos aumentam o grau de excitação, favorecendo a identificação dos componentes.

O equipamento utilizado na pesquisa foi o modelo X-ray fluorescence mesa-50 of the HORIBA, sendo o equipamento utilizado em conjunto com o software Horiba X6T-5X00 series, com os seguintes parâmetros:

- Voltagem: (15Kv ou 50Kv);
- Filtro: (Low, Mid e Hiper);
- Collmottr: (1, 2, 3 ou 7mm);
- Auto electric current: (~200µa) Maximum volume.

3.2.2 Caracterização das argamassas no estado fresco

3.2.2.1 Índice de consistência (flow table)

O índice de consistência é uma propriedade importante nas argamassas que serve para medir a trabalhabilidade e aplicabilidade nas mais diversas áreas da construção civil, como argamassas para emboço, assentamento de alvenarias, chapisco, reboco, entre outros. Dado índice está diretamente ligado a relação água-cimento do material, considerando que esse é responsável pela fluidez da mistura.

Antes do ensaio de consistência, a argamassa deve ser produzida com o auxílio de misturador mecânico para uma melhor homogeneidade do material. A mesa de consistência ou *Flow Table* consiste na coleta da argamassa no estado fresco e colocação no tronco de cone sobre uma mesa que simulará uma queda livre do material, conforme a Figura 14.

Figura 14 – Ensaio de consistência da argamassa.



Fonte: Autor

De acordo com a NBR 13.726, deve ser preenchido em três camadas, onde a primeira devendo ser aplicados 15 golpes com o soquete, a segunda com 10 golpes e a última com 5 golpes. Ao final do preenchimento, remove-se o troncônico verticalmente e acionar a manivela 30 vezes em 30 segundos, de modo que a argamassa caia uniformemente durante todo o ensaio (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016). Após a etapa dos golpes na mesa de fluidez, deve-se medir três diâmetros do espalhamento das argamassas, realizar uma média para as medidas e arredondar para o inteiro mais próximo.

3.2.2.2 *Densidade de massa e teor de ar incorporado*

O ensaio de densidade de massa seguiu os parâmetros normativos da NBR 13.278, além da preparação das argamassas que seguiram os parâmetros normativos da NBR 13.276. Inicialmente pesou-se o recipiente vazio, conforme a figura 15, e posteriormente preenchido

com argamassa, que foi realizado em três etapas com adensamento de 20 golpes em cada camada (ABNT, 2020).

Figura 15 – Ensaio de consistência da argamassa.



Fonte: Autor (2024)

Para o cálculo da densidade de massa das argamassas, utilizou-se a Equação 01:

Equação 1 - Densidade de massa

$$d = \frac{M_c - M_v}{V_r} 1000$$

Onde:

- M_c é a massa do recipiente cilíndrico contendo a argamassa de ensaio, em gramas;
- M_v é a massa do recipiente cilíndrico vazio, em gramas;
- V_r é o volume do recipiente cilíndrico, em centímetros cúbicos.

Em relação ao teor de ar incorporado, seguiu-se os parâmetros normativos determinados pela NBR 13.278, onde aplicamos a Equação 02:

Equação 2 – Teor de ar incorporado

$$A = 100 \left(1 - \frac{d}{d_t} \right)$$

Onde:

- d é o valor da densidade de massa da argamassa, em gramas por centímetro cúbico;
- dt é o valor da densidade de massa teórica da argamassa, em gramas por centímetro cúbico, sem vazios.

De acordo com a supracitada norma técnica da ABNT, para a determinação da densidade de massa teórica das argamassas produzidas em obras, deve-se utilizar a Equação 03:

Equação 3 – Densidade de massa teórica

$$dt = \frac{\sum mi}{\sum \frac{mi}{\gamma i}}$$

Onde:

- mi é a massa seca de cada componente da argamassa, mais a massa da água;
- γi é a massa específica de cada componente da argamassa.

3.2.3 Caracterização das argamassas no estado endurecido

3.2.3.1 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão tem por objetivo quantificar a resistência mecânica das argamassas e concretos sob a ação de compressão aplicadas axialmente, ou seja, ao longo do eixo do material. A resistência a compressão é uma propriedade importante no processo de avaliação da qualidade, desempenho e durabilidade dos compósitos cimentícios.

O procedimento para a realização do ensaio consiste, inicialmente, na preparação dos corpos de prova (CPs) que estavam em cura úmida por 28 dias. Antes da colocação dos testemunhos no equipamento, avaliou-se a necessidade de regularização da superfície de contato com possível retificação dos CPs para melhor equalização das cargas.

Em seguida, os cilindros de argamassas foram posicionados na prensa eletrônica para a aplicação da carga e medição da resistência característica do material em análise. Após o rompimento, efetuou-se os cálculos de resistência à compressão considerando a carga máxima suportada pelo material e a área da seção transversal do corpo cilíndrico de (5x10) cm.

Figura 16 – Preparação para o ensaio de resistência à compressão.



Fonte: Autor

3.2.3.2 Resistência à tração na flexão

Para a avaliação das propriedades mecânicas das argamassas, foi realizado o ensaio de resistência à tração na flexão, conforme a norma ABNT NBR 13279:2019. Esse ensaio é fundamental para determinar a capacidade da argamassa de resistir a esforços de tração e flexão, fornecendo informações cruciais sobre seu desempenho estrutural e durabilidade. As amostras de argamassa foram moldadas em barras prismáticas com dimensões de 40 x 40 x 160 mm, de acordo com a norma ABNT NBR 13279:2019. Após a moldagem, as amostras foram curadas em condições controladas por um período de 28 dias, garantindo a uniformidade e a consistência dos resultados.

O ensaio de resistência à tração na flexão foi realizado conforme as seguintes etapas. Inicialmente, as barras prismáticas foram posicionadas sobre dois apoios, com uma distância de 100 mm entre eles. Em seguida, a carga foi aplicada no centro da barra prismática por meio de um terceiro apoio situado no ponto médio da barra. A carga foi aumentada continuamente até a ruptura da amostra, momento em que foi registrada a carga máxima suportada.

A resistência à tração na flexão foi calculada utilizando a seguinte fórmula:

Equação 4 – Absorção de água por capilaridade

$$f = \frac{3PL}{2bd^2}$$

onde:

- P é a carga máxima aplicada (N);
- L é a distância entre os apoios (mm);
- b é a largura da amostra (mm);
- d é a altura da amostra (mm).

A resistência à tração na flexão é um indicador crucial da capacidade da argamassa de resistir a tensões de tração, influenciando diretamente a integridade estrutural das argamassas. Além disso, esse ensaio auxilia na previsão da durabilidade das argamassas sob condições de serviço reais e na avaliação da qualidade dos materiais, permitindo a comparação entre diferentes formulações e garantindo que atendam aos requisitos normativos e de desempenho.

3.2.3.3 *Ensaio de absorção por capilaridade*

O ensaio de absorção por capilaridade consiste em uma propriedade importante das argamassas, considerando que diversas manifestações patológicas em revestimentos argamassados estão relacionados a estanqueidade do revestimento. O procedimento seguiu as recomendações da NBR 15259 (ABNT, 2012), onde os corpos de prova prismáticos são moldados e ensaiados com 28 dias de sua produção.

Os corpos de prova passaram pelo processo de secagem em estufa a 105°C até atingir uma massa constante. Após a secagem, o material foi resfriado e pesado, a fim de determinar a massa inicial. Em seguida, foram feitas marcações com 5 mm, com tolerância de 1 mm, na superfície inferior dos corpos de prova.

Com objetivo de remover sujidades ou excesso de desmoldantes na face inferior, realizou-se um lixamento e limpeza com pincel para a remoção da pulverulência. Posteriormente foram os materiais foram depositados em um recipiente e preenchidos com água até a marcação anteriormente realizada, onde passados 10 e 90 minutos procedeu-se as pesagens dos materiais.

Para o cálculo da absorção por capilaridade de cada material, utilizou-se a Equação 05:

Equação 5 – Absorção de água por capilaridade

$$At = \frac{Mt - M0}{S}$$

Onde:

- At é a absorção de água por capilaridade em um determinado tempo definido, em gramas por centímetro quadrado;
- $M0$ é a massa inicial, material seco, em gramas;
- Mt é a massa do material no tempo “ t ”, 10 ou 90 minutos, em gramas;
- S é a área da seção do corpo de prova, em centímetros quadrados.

A NBR 15259 (ABNT, 2012) indica um outro parâmetro importante, o coeficiente de capilaridade, onde foi utilizada a Equação 06:

Equação 6 – Absorção de água por capilaridade

$$C = (Mt - M0)$$

Onde:

- At é a absorção de água por capilaridade em um determinado tempo definido, em gramas por centímetro quadrado;
- $M0$ é a massa inicial, material seco, em gramas;
- Mt é a massa do material no tempo “ t ”, 10 ou 90 minutos, em gramas;
- S é a área da seção do corpo de prova, em centímetros quadrados.

Capítulo 4

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com objetivo de melhor identificar os corpos de prova, foram estabelecidas nomenclaturas alfanuméricas para cada uma das famílias dos corpos de prova, seguindo a Tabela 08:

Tabela 8 - Caracterização dos traços.

Nomeclatura dos CPs	Descrição	Proporção
REF	Traço de referência	1 : 1 : 6
SCIM	Substituição de 10% de cimento	0,9 : 1 : 6 : 0,1
SARE	Substituição de 10% de Areia	1 : 1 : 5,4 : 0,6
APP	Adição de 10% de pó de pedra	1 : 1 : 6 : 0,1
SCAL	Substituição de 10% da Cal	1 : 0,9 : 6 : 0,1

Fonte: Autor (2023)

4.1 Análises microestruturais do material

4.1.1 Ensaio de Fluorescência de Raios-X

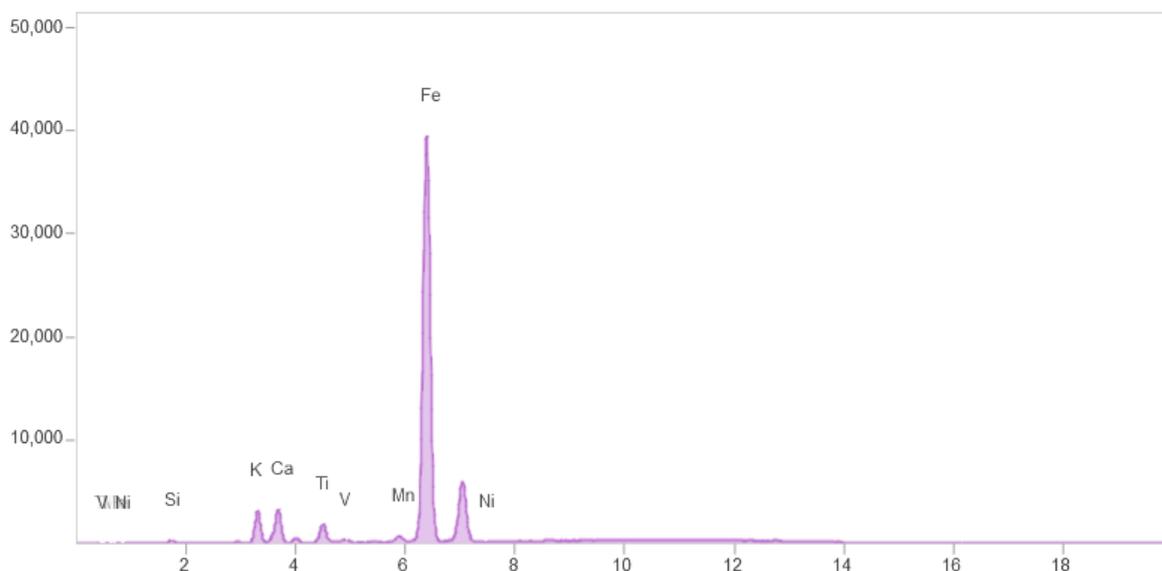
O ensaio de FRX foi executado de acordo com os parâmetros descritos na metodologia, onde buscou entender o comportamento do material e identificar formações cristalinas do material. Inicialmente, foi ensaiado o pó de pedra para o entendimento da composição do material isoladamente, conforme os resultados de concentrações trazidos na tabela 9 e espectros na figura 17.

Tabela 9 – Composição química do pó de pedra.

Element	Concentration	Unit	Line	Intensity	Judgment
CaO	7.2096	wt%	K α	3512.53	---
SiO ₂	65.4896	wt%	K α	285.07	---
K ₂ O	8.3725	wt%	K α	3257.44	---
TiO ₂	2.2043	wt%	K α	2146.26	---
Fe ₂ O ₃	16.5146	wt%	K α	50711.76	---
Mn	0.2062	wt%	K α	770.39	---
Ni	0.0033	wt%	K α	13.54	---
V	0.0000	wt%	K α	0.00	---

Fonte: Autor (2023)

Figura 17 - Espectro de FRX do pó de pedra.



Fonte: Autor

Observa-se que o pó de pedra possui uma grande concentração de dióxido de silício (SiO_2) 65,49%, óxido de ferro (Fe_2O_3) 16,51%, óxido de potássio (K_2O) 8,37% e óxido de cálcio (CaO) 7,21%. Todos os materiais são fundamentais na composição química do cimento, o que torna o pó de pedra um material com grande contribuição para o compósito.

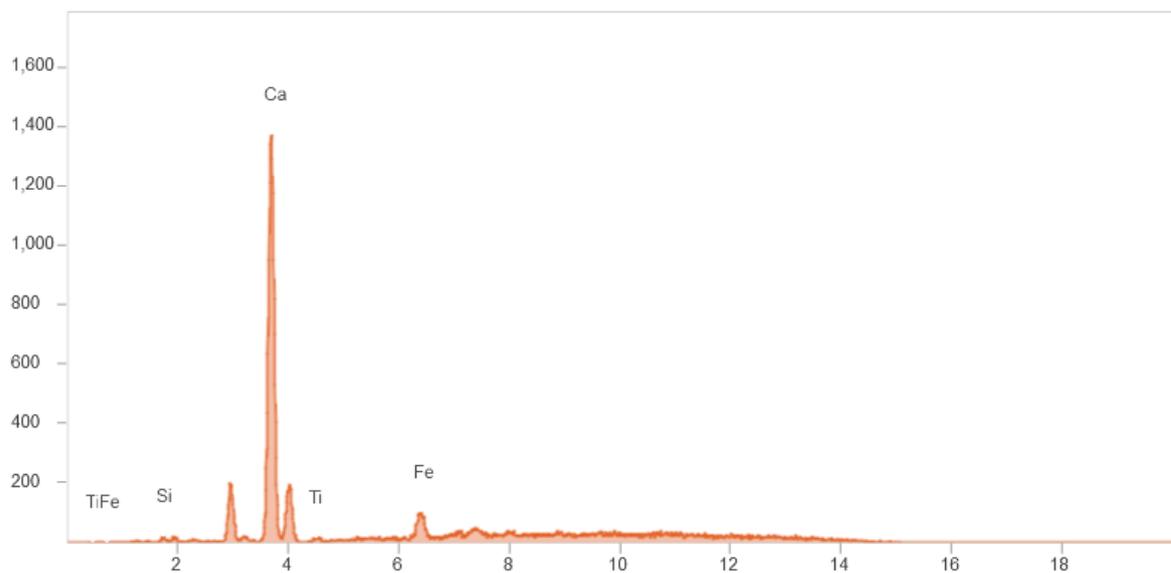
As proporções de argamassas foram ensaiadas em seguida, a fim de identificarmos as proporções de materiais presentes, bem como a interações entre a massa cimentícia e os resíduos de pó de pedra. Inicialmente, foi ensaiada a proporção de referência (1:1:6), com relação água/cimento de 1,4 e sem adição de pó de pedra, seguindo para a substituição de 10% da massa de cimento, 10% do agregado miúdo e adição de 10% à massa total, conforme as tabelas de concentrações 10, 11, 12 e 13 e espectros nas figuras 18, 19, 20 e 21.

Tabela 10 – Composição química da argamassa de referência (1:1:6).

Element	Concentration	Unit	Line	Intensity	Judgment
CaO	46.8019	wt%	K α	1448.05	---
SiO ₂	51.8640	wt%	K α	13.20	---
K ₂ O	0.0000	wt%	K α	0.00	---
TiO ₂	0.4169	wt%	K α	13.48	---
Fe ₂ O ₃	0.9173	wt%	K α	114.98	---

Fonte: Autor (2023)

Figura 18 – Espectro de FRX da argamassa de referência (1:1:6).



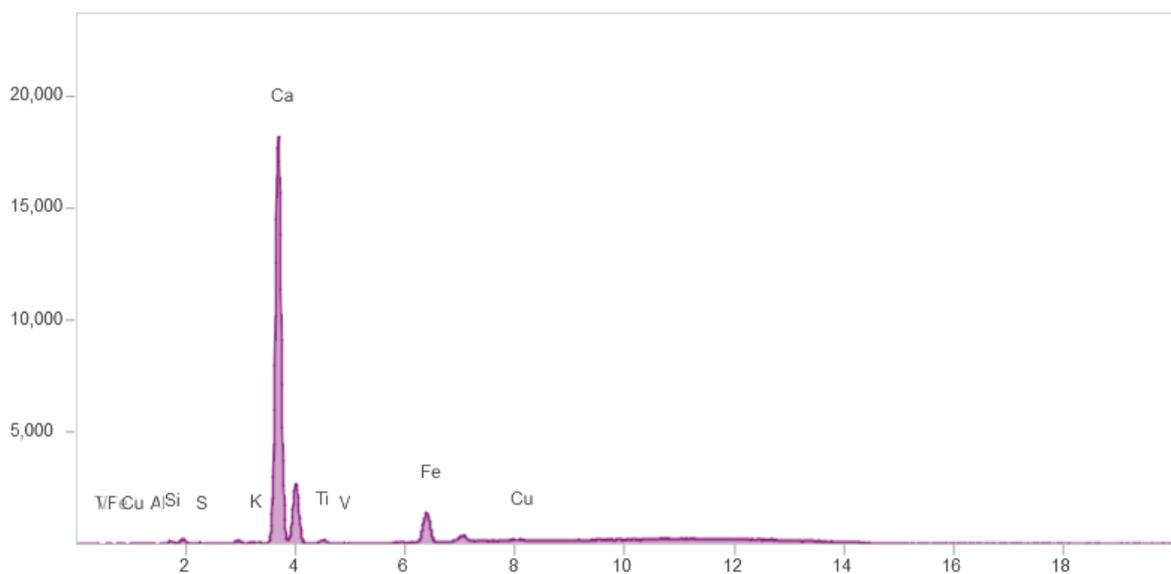
Fonte: Autor

Tabela 11 - Composição química da argamassa com substituição de 10% de cimento (0,9:1:6:0,1).

Element	Concentration	Unit	Line	Intensity	Judgment
CaO	57.7862	wt%	K α	19309.72	---
Al ₂ O ₃	4.3424	wt%	K α	2.97	---
SO ₃	0.7765	wt%	K α	12.00	---
CuO	0.0516	wt%	K α	96.28	---
V ₂ O ₅	0.0226	wt%	K α	9.76	---
SiO ₂	34.6203	wt%	K α	84.80	---
K ₂ O	0.2999	wt%	K α	84.11	---
TiO ₂	0.5933	wt%	K α	180.79	---
Fe ₂ O ₃	1.5073	wt%	K α	1766.15	---

Fonte: Autor (2023)

Figura 19 – Espectro de FRX da argamassa com substituição de 10% de cimento (0,9:1:6:0,1).



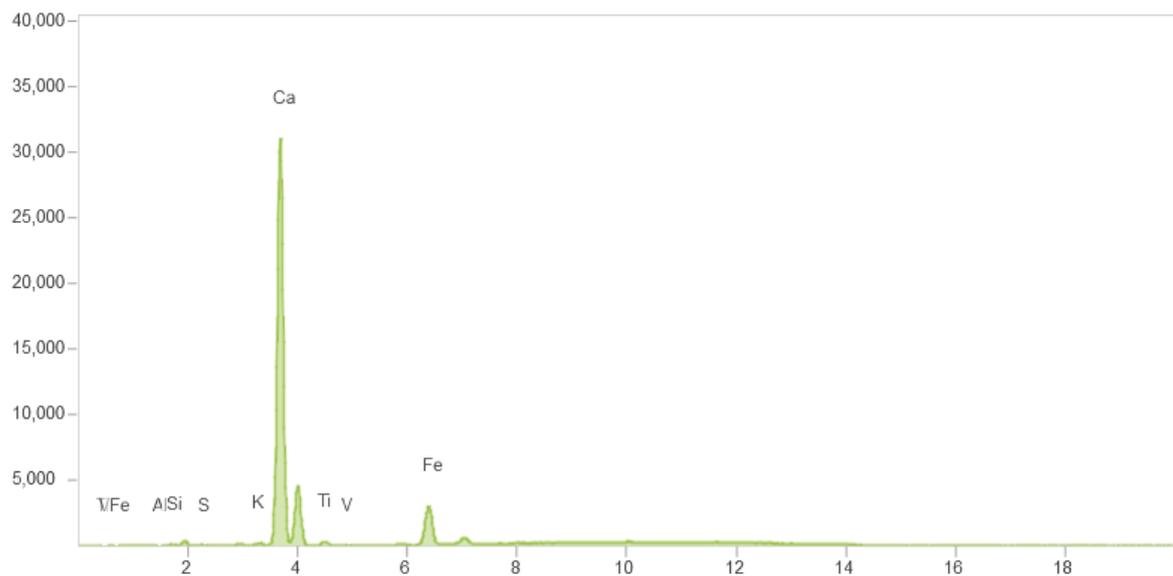
Fonte: Autor

Tabela 12 - Composição química da argamassa com substituição de 10% da areia (1:1:5,4:0,6).

Element	Concentration	Unit	Line	Intensity	Judgment
CaO	63.8829	wt%	K α	32991.62	---
Al ₂ O ₃	1.3949	wt%	K α	1.43	---
SO ₃	0.8824	wt%	K α	22.30	---
CuO	0.0071	wt%	K α	18.69	---
V ₂ O ₅	0.0253	wt%	K α	15.82	---
SiO ₂	30.2015	wt%	K α	116.42	---
K ₂ O	0.5480	wt%	K α	247.53	---
TiO ₂	0.7951	wt%	K α	349.90	---
Fe ₂ O ₃	2.2627	wt%	K α	3798.96	---

Fonte: Autor (2023)

Figura 20 - Espectro de FRX da argamassa com substituição de 10% de da areia (1:1:5,4:0,6).



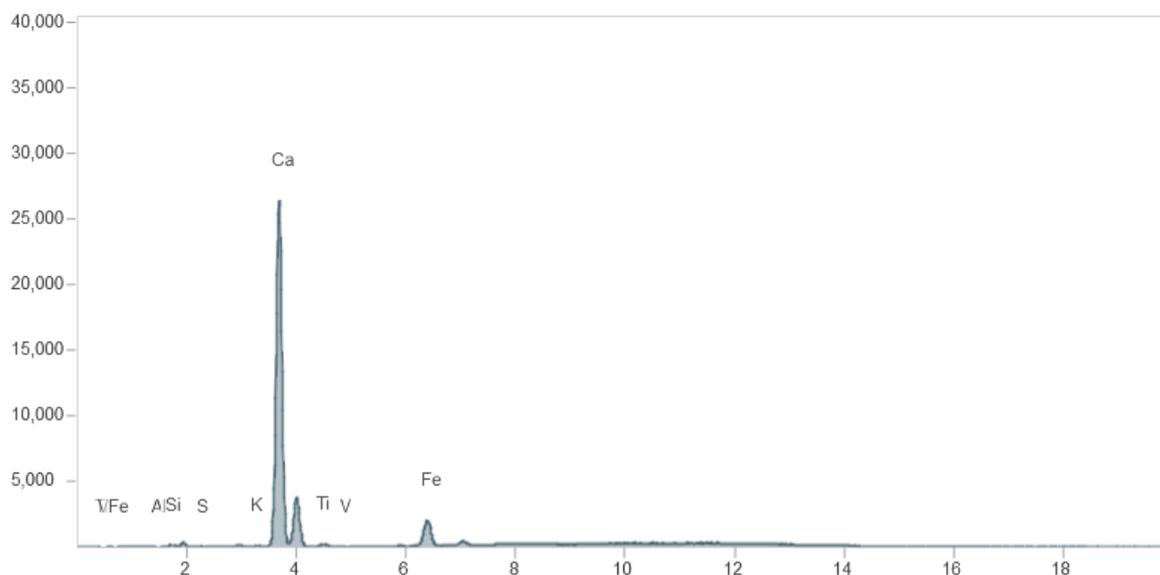
Fonte: Autor

Tabela 13 – Composição química da argamassa com Adição de 10% da pó de pedra (1:1:6:0,1).

Element	Concentration	Unit	Line	Intensity	Judgment
CaO	55.6474	wt%	K α	27736.79	---
Al ₂ O ₃	0.4834	wt%	K α	0.50	---
SO ₃	1.0468	wt%	K α	23.76	---
CuO	0.0240	wt%	K α	68.94	---
V ₂ O ₅	0.0174	wt%	K α	11.53	---
SiO ₂	40.5830	wt%	K α	159.23	---
K ₂ O	0.2884	wt%	K α	119.00	---
TiO ₂	0.5058	wt%	K α	236.63	---
Fe ₂ O ₃	1.4038	wt%	K α	2529.28	---

Fonte: Autor (2023)

Figura 21 – Espectro de FRX da argamassa com Adição de 10% da pó de pedra (1:1:6:0,1).



Fonte: Autor

Conforme observado, há uma considerável concentração de óxido de Cálcio (CaO), dióxido de silício (SiO₂), óxido de alumínio (Al₂O₃), principais compostos do cimento. Ou seja, pode-se

afirmar que a inserção do pó de pedra no material contribuiu para o aumento de compostos químicos que beneficiam as propriedades mecânicas e químicas do cimento.

O óxido de cálcio presente no cimento potencializa as propriedades mecânicas do cimento, pois durante o processo de hidratação, a cal, por ser um aglomerante aéreo, funciona como um lubrificante das partículas de cimento, auxiliando-o no processo de hidratação. O dióxido de silício no processo de hidratação reage quimicamente com o óxido de cálcio e forma o silicato de cálcio, material que em contato com a água de amassamento garante o efeito aglomerante do cimento. Foi observado durante o processo, que a inserção do pó de pedra melhorou a trabalhabilidade do material.

Em relação à alumina, quando reage com a água formam os aluminatos de cálcio, composto químico que acelera o tempo de pega do cimento e reduz a resistência aos sulfatos. Ou seja, o ganho do óxido de alumínio no composto cimentício beneficia a aceleração do processo de endurecimento das argamassas.

4.2 Argamassas no estado fresco

4.2.1 Flow table

Os dados referentes ao índice de consistência das argamassas, propriedade em que visa analisar a trabalhabilidade das argamassas, onde influencia diretamente na aplicação e uso do material. A tabela 14 aborda as medições do espalhamento das argamassas e média do índice de consistência das argamassas, tal como a figura 19 com o gráfico de barra com as médias e índices de consistência do material:

Tabela 14 - Caracterização dos traços.

Ensaio de Flow table					
Dimensões	REF	SCIM	SARE	APP	SCAL
1	285	264	265	265	295
2	285	265	275	270	285
3	290	266	285	275	290
Média (s)	287	265	275	270	290

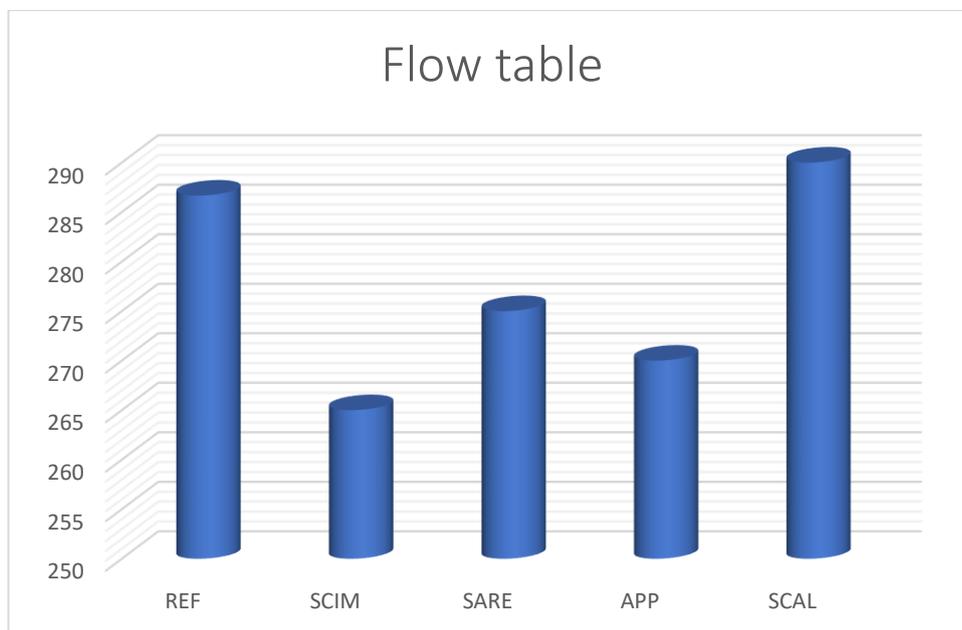
Fonte: Autor (2023)

As médias dos ensaios retratam a consistência dos materiais durante a fase fresca, onde observa-se que há um comportamento uniforme entre as consistências. Apesar da proporção de referência possuir uma consistência mais fluida, a substituição de 10% da massa de cimento por resíduo apresentou consistência ideal para os parâmetros normativos. O resultado está

relacionado a redução de cimento e a elevada quantidade de finos do resíduo, o que demanda um maior consumo de água. Em relação a substituição de areia e adição de pó de pedras, as consistências obtiveram valores semelhantes, podendo ser explicado pela semelhança entre os materiais. Além disso, o pó de pedra possui grãos maiores e grande quantidade de finos, compensando a área superficial do resíduo.

Em comparação da proporção de referência com a substituição da areia, observa-se uma redução percentual de 4% da consistência do material. Data característica do material está relacionada a quantidade de finos do resíduo em relação a areia, pois quanto maior o módulo de finura do material, melhor a trabalhabilidade da argamassa.

Figura 22 – Resultados do ensaio de flow table – Índice de consistência



Fonte: Autor

Os resultados apontam que a relação água/cimento precisa ser ponderada em todas as substituições e adições, haja vista que o resíduo possui grande quantidade de finos, que influenciam diretamente a trabalhabilidade do material.

4.2.2 Densidade de massa

A densidade de massa é um resultado importante nas argamassas, pois quanto maior a densidade das argamassas, maior a sua capacidade de absorção das tensões, ou seja, maior módulo de elasticidade. Os resultados da densidade de massa estão presentes na tabela 15:

Tabela 15 – Densidade de massa das argamassas

Densidade de massa					
Dimensões	REF	SCIM	SARE	APP	SCAL
MC	1114	1149	1286.5	1256.5	1155
MV	747.5	730.5	879.5	880.5	743
VR	196.34	196.34	196.34	196.34	196.34
A	1.87	2.13	2.07	1.92	2.10

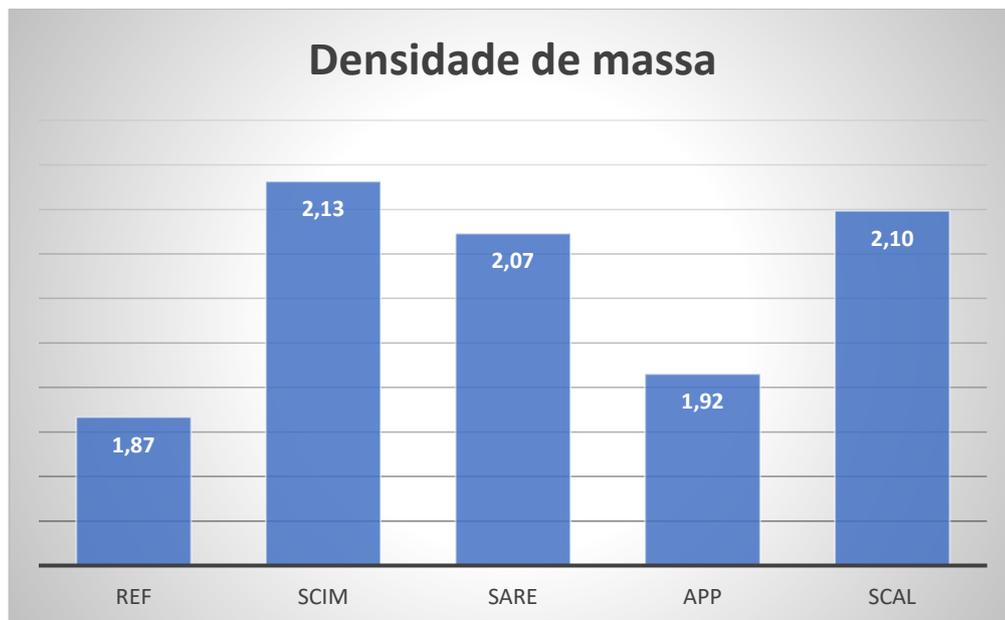
Fonte: Autor (2024)

Onde:

- Mc é a massa do recipiente cilíndrico contendo a argamassa de ensaio, em gramas;
- Mv é a massa do recipiente cilíndrico vazio, em gramas;
- Vr é o volume do recipiente cilíndrico, em centímetros cúbicos.

Os resultados relatam que em todas as proporções de adições ou substituições de resíduo de pó de pedra há um incremento na densidade do material, e, conseqüentemente de seu módulo de elasticidade. A maior diferença foi relatada na comparação da proporção de referência com a substituição do cimento e cal hidratada, visto que estes materiais possuem um considerável gradiente de densidade quando comparados entre si. Os resultados podem ser melhor observados no gráfico de barras na Figura 22.

Figura 23 – Densidade de massa



Fonte: Autor (2024)

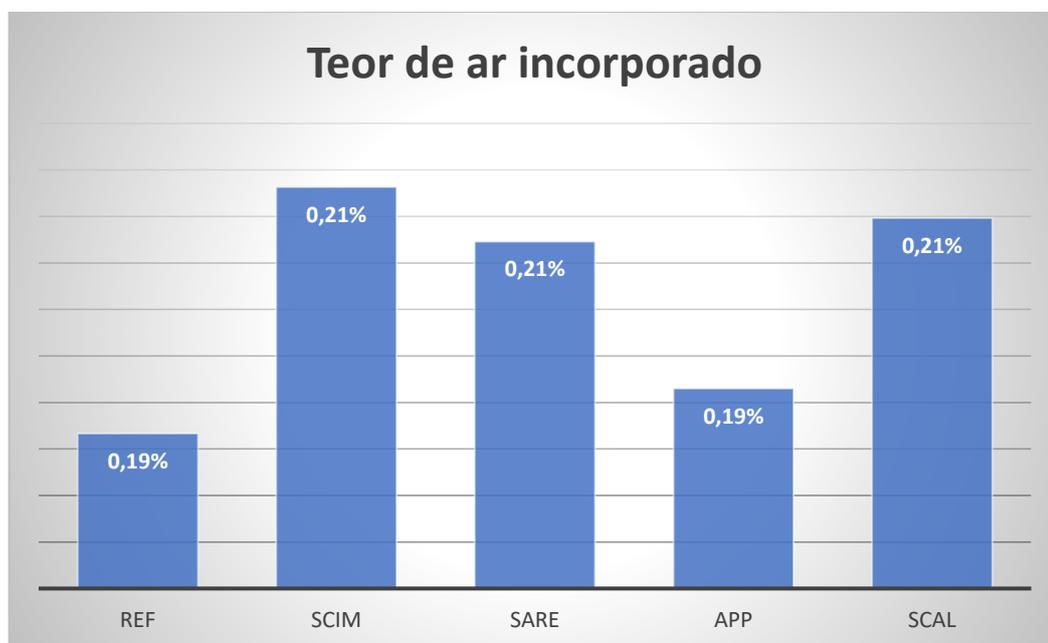
O comportamento da densidade se mantém semelhante à referência na adição de pó de pedras, pois a proporção acrescenta apenas 70,5 gramas de resíduo, massa relativamente baixa, que resultou em pequena diferença de dada propriedade do material.

Durante a elaboração dos traços, a substituição de areia foi a proporção que incorporou a maior massa de resíduo em sua composição, onde foram adicionados 422 gramas de resíduo no traço. Apesar de possuir maior densidade em relação à referência, não foi a argamassa mais densa. O resultado pode ser explicado pela similaridade com a densidade da areia e sua substituição provocou uma diferença de apenas 11%, aproximadamente.

4.2.3 Teor de ar incorporado

O teor de ar incorporado nas argamassas corresponde aos vazios presentes nas argamassas, característica importante nas argamassas, pois relaciona a porosidade do material. Argamassas com maiores teores de ar em sua composição tendem a ser mais porosas e a depender da comunicação dos poros, influencia diretamente na absorção capilar da argamassa. Os resultados do teor de ar incorporado podem ser observados na figura 24, onde constam todos os dados em porcentagem.

Figura 24 – Teor de ar incorporado



Fonte: Autor (2024)

As argamassas de substituição de cimento, areia e cal resultaram em um maior teor de ar incorporado, fenômeno explicado pela variação granulométrica do resíduo, que possui grãos retidos nas peneiras 4,75 até 0,075, aumentando também a porosidade do material. Argamassas

porosas podem ser ideais para o tratamento de manifestações patológicas relacionadas a absorção capilar, como a umidade ascendente em blocos cerâmicos.

A adição de pó de pedras a proporção de referência resultou na manutenção de dada propriedade, justificando que o material pulverulento do resíduo preencheu os vazios presentes na argamassa de referência, auxiliando em dada propriedade.

4.3 Argamassas no estado endurecido

4.3.1 Ensaio de resistência à compressão corpos de prova cilíndricos

Os dados referentes a resistência à compressão dos corpos de prova de referência, substituição de 10% de cimento, substituição de 10% da areia, substituição de 10% e adição de 10% de pó de pedra constam na Tabela 16:

Tabela 16 – Resistência das argamassas

Argamassas (Mpa)					
Número de identificação	REF	SCIM	SCAL	SARE	APP
1	5,496	4,796	5,945	6,045	5,796
2	4,746	5,096	5,846	5,646	5,246
3	5,046	5,046	5,446	6,395	5,346
4	5,596	4,796	5,496	5,796	5,346
5	5,995	5,346	5,646	5,995	5,646
6	4,796	4,996	5,546	6,045	6,045
Média (MPa)	5,279	5,013	5,654	5,987	5,571

Fonte: Autor (2024)

Os resultados relacionados a resistência das argamassas mostram um comportamento aproximado da resistência dos materiais, comprovando uma simetria comportamental da incorporação dos resíduos.

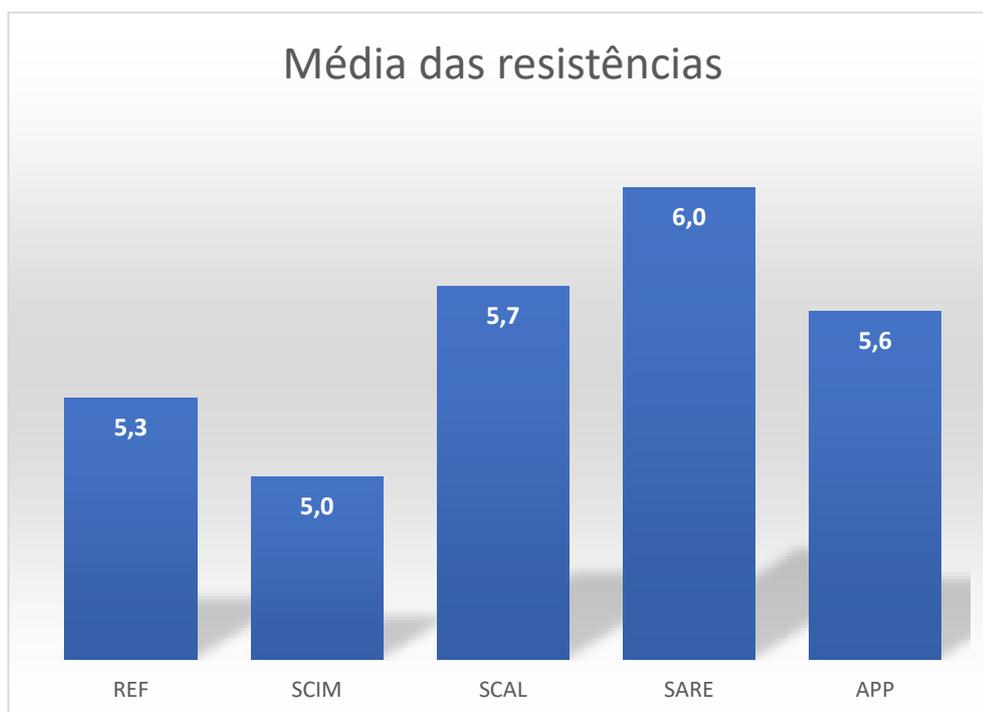
A argamassa produzida com substituição de 10% de cimento em relação a proporção de referência, obtiveram um decréscimo em 5% em sua resistência mecânica. A redução do aglomerante e excesso de finos presentes no resíduo de pó de pedra, pode ter potencializado a perda de resistência do material, pois uma vez em que se reduz a quantidade de aglomerante na proporção, a união entre os agregados é comprometida, reduzindo a resistência do compósito cimentício.

Em relação a substituição de 10% de areia por pó de pedra, conferiu-se um acréscimo de resistência na ordem de 13,4%. Sendo a substituição da areia o maior incremento de resistência,

um fator determinante no resultado está relacionado a resistência da brita em relação a areia, que é relevantemente superior, aprimorando o material. Seguindo para a adição de 10% de resíduo às proporções iniciais, também se observou um comportamento de incremento de resistência na ordem de 5%. Uma observação importante sobre a adição de pó de pedras está relacionada a textura do material, onde constatou-se uma rugosidade superficial superior as demais proporções.

A substituição da cal hidratada também proporcionou resultados de aumento em 7% da sua resistência, podendo ser correlacionado a quantidade de finos presentes no resíduo, característica de um aglomerante aéreo como a cal. Apesar de pequenas variações, os estudos comprovam um comportamento semelhante às composições de referência, conforme a tendência do gráfico das médias de resistência, constantes na figura 25.

Figura 25 - Gráfico das médias de resistência.



Fonte: Autor (2024)

Entretanto, para um bom desempenho do material, não somente devem ser priorizados os ensaios de resistência à compressão, mas também análises do módulo de elasticidade e resistência à tração do material, visto que considerando a elevada esbelteza dos edifícios modernos os revestimentos sofrem com as solicitações excessivas no sistema de fachadas.

4.3.2 Ensaio de resistência à compressão (corpos de prova prismáticos)

Durante a elaboração da pesquisa, também foram moldados corpos de provas prismáticos com dimensões de 4 cm x 4 cm x 16 cm, em atendimento a NBR 13279 (ABNT, 2011). Após 24 horas da moldagem dos corpos de prova, os CP's foram submetidos a uma cura úmida pelo tempo de 28 dias, obtendo os resultados de resistência constantes na tabela 17.

Tabela 17 – Resistência das argamassas

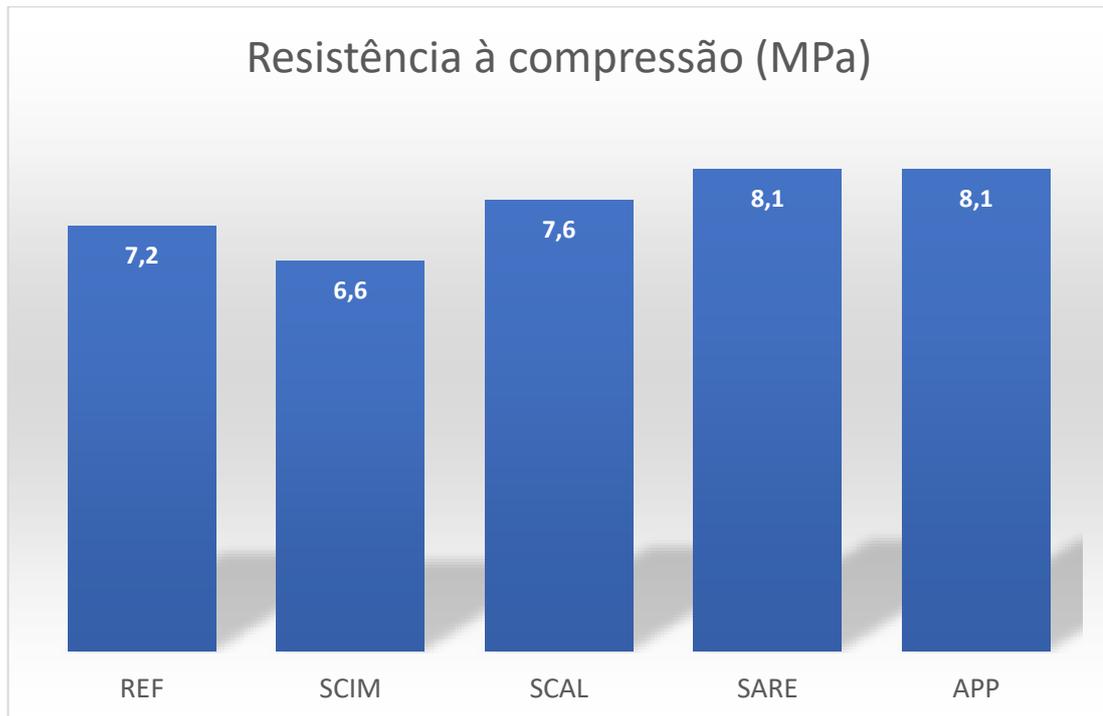
Resistência à compressão					
Número de identificação do CP	REF	SCIM	SCAL	SARE	APP
1	7,478	6,345	8,029	6,804	8,704
2	6,497	6,464	7,846	7,723	7,662
3	6,865	6,584	7,355	8,336	8,642
4	7,600	6,824	7,417	8,397	8,397
5	8,152	6,644	7,600	8,765	7,846
6	6,512	6,644	7,478	8,826	7,600
Média (MPa)	7,184	6,584	7,621	8,142	8,142

Fonte: Autor (2024)

De forma geral, os corpos de prova seguiram uma tendência de variação de sua resistência semelhante aos corpos de prova cilíndricos. Entretanto, observa-se uma elevação média de 37% na resistência de todas as composições. Fator relevante observado no ensaio com argamassas está relacionado a comparação da utilização dos corpos de prova cilíndricos com os prismáticos. Pôde-se observar que os CP's prismáticos, por possuírem uma melhor superfície de contato, proporcionam melhores resultados do ensaio de resistência à compressão.

Considerando a resistência mecânica das argamassas compostas pela substituição de 10% da areia, onde possuem uma resistência equivalente a 8,142 MPa, dado material possui um excelente comportamento para aplicações de argamassas de assentamento de blocos, tanto para alvenarias de vedação, quanto para alvenarias estruturais. Outro campo de aplicação das argamassas com boa resistência mecânica é no sistema de impermeabilização em mantas asfálticas que necessitam de uma proteção mecânica, visto que sua resistência atenderá os requisitos normativos vigentes. Considerando as variações de resistências, os estudos comprovam um comportamento semelhante às composições de referência, excetuando a substituição de cimento por 10% de pó de pedras, conforme a tendência do gráfico das médias de resistência, constantes na figura 26.

Figura 26 - Gráfico das médias de resistência.



Fonte: Autor (2024)

Um dos fatores importantes nos resultados foram as pequenas variações entre os ensaios de resistência das argamassas de substituição de 10% de areia e adição de 10% de resíduo, garantindo uma uniformidade dos materiais. Em relação a resistência a compressão, com exceção do decréscimo da substituição do cimento, a adição de resíduo aumentou a resistência à compressão dos materiais, ampliando o campo de aplicação das argamassas na construção civil.

4.3.3 Ensaio de resistência à tração na flexão

Os ensaios de resistência à tração na flexão seguiram as recomendações da NBR 13279 (ABNT, 2011), onde os corpos de prova prismáticos com dimensões de 4 cm x 4 cm x 16 cm são bi-apoiados em roletes e as cargas são aplicadas perpendicularmente equidistantemente na maior dimensão do prisma. A tabela 18 apresenta todos os dados de resistência à tração na flexão das respectivas composições de argamassas.

Tabela 18 – Resistência das argamassas

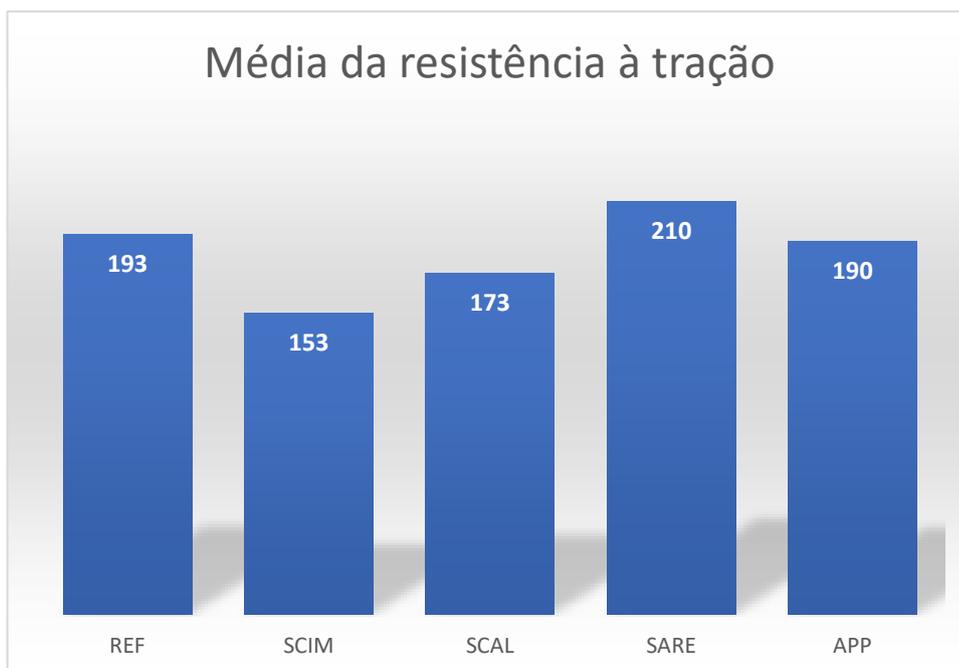
Número de identificação do CP	REF	SCIM	SCAL	SARE	APP
1	190	150	180	210	200
2	200	150	160	220	190
3	190	160	180	200	180
Média (Kgf)	193,3	153,3	173,3	210	190

Fonte: Autor (2024)

Observa-se um comportamento de elevação resistência à tração na flexão das argamassas com substituição parcial de 10% de areia por pó de pedra, promovendo um incremento de 8,6% quando comparado com a argamassa de referência. Assim como na resistência à compressão, as proporções de adição de resíduo em 10% mantiveram um comportamento uniforme a referência, relatando que a aditivação do resíduo traz benefícios tanto para a resistência à compressão, quanto na resistência à tração na flexão.

Em relação as substituições dos aglomerantes, tanto hidráulico (cimento) quanto o aéreo (cal), demonstram um comportamento de decréscimo em sua resistência à tração em 20,7% para o cimento e 10,3% para a cal. Com objetivo de elucidar os dados e resultados, a figura 27 aborda de forma gráfica os resultados médios das resistências a tração na compressão.

Figura 27 – Resistência à tração



Fonte: Autor (2024)

Considerando todas as resistências mecânicas, como resistência à compressão nos corpos de prova cilíndricos, prismáticos e resistência à tração na flexão, as argamassas de substituição de 10% de areia e adição de pó de pedras em 10% relatam resultados importantes e facilitam a possibilidade da utilização do resíduo para as mais diversas atividades da construção civil, seja na construção de novos edifícios, quanto na recuperação e reparos em edificações já habitadas.

Tabela 19 – Resistência das argamassas

Resistência à tração (Mpa)					
Número de identificação do CP	REF	SCIM	SCAL	SARE	APP
1	3,9	3,1	3,7	4,4	4,2
2	4,2	3,1	3,3	4,6	3,9
3	3,9	3,3	3,7	4,2	3,7
Média (MPa)	4,0	3,2	3,6	4,4	3,9
Desvio padrão	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2

Fonte: Autor (2024)

A argamassa de referência apresentou uma resistência à tração na flexão de 4,0 MPa. Este valor serve como base comparativa para avaliar o impacto da substituição de componentes por pó de pedras. Observou-se que a substituição de 10% do cimento por pó de pedras resultou em uma redução significativa da resistência à tração na flexão para 3,2 MPa, com um desvio padrão de 0,1 MPa. Essa redução de 20% na resistência sugere que o cimento é um componente crucial para a resistência da argamassa, e sua substituição por pó de pedras pode comprometer a integridade estrutural da mesma.

Por outro lado, a substituição de 10% da cal por pó de pedras resultou em uma resistência de 3,6 MPa, com um desvio padrão de 0,2 MPa. A redução na resistência foi menos pronunciada em comparação com a substituição do cimento, indicando que a cal tem um papel menos significativo na resistência à tração na flexão da argamassa. Este resultado sugere que, embora a cal contribua para a resistência, sua substituição parcial por pó de pedras é mais viável do que a substituição do cimento.

A substituição de 10% da areia por pó de pedras apresentou um comportamento diferente, resultando em um aumento da resistência para 4,4 MPa, com um desvio padrão de 0,2 MPa. Este aumento na resistência pode ser atribuído à melhor distribuição granulométrica proporcionada pelo pó de pedras, que pode preencher vazios e proporcionar uma matriz mais densa e coesa. Este resultado é particularmente interessante, pois sugere que a incorporação de

pó de pedras como substituto da areia pode não apenas manter, mas até melhorar a resistência mecânica da argamassa.

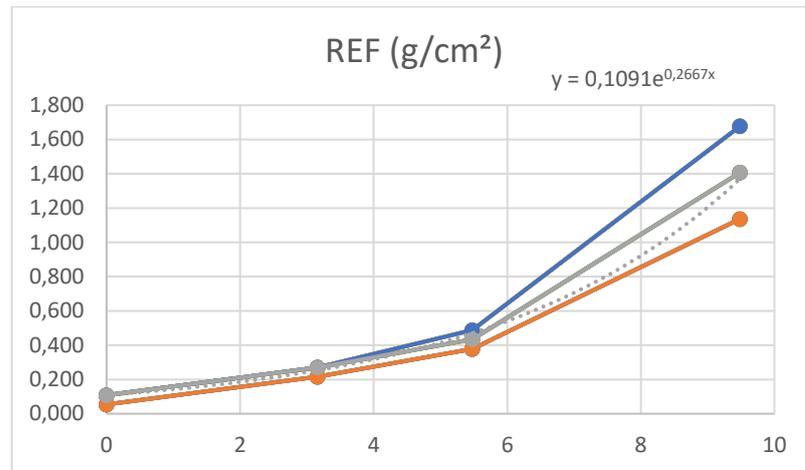
Finalmente, a adição de 10% de pó de pedras na formulação original da argamassa resultou em uma resistência de 3,9 MPa, com um desvio padrão de 0,2 MPa. Esta pequena redução em comparação com a argamassa de referência indica que a adição de pó de pedras, sem remover outros componentes, mantém a resistência à tração na flexão praticamente inalterada. Este resultado mostra que o pó de pedras pode ser incorporado à argamassa sem comprometer significativamente suas propriedades mecânicas, o que pode ser vantajoso em termos de custo e sustentabilidade.

Em conclusão, a substituição de diferentes componentes da argamassa por pó de pedras apresentou variações significativas na resistência à tração na flexão. A substituição do cimento teve o maior impacto negativo, enquanto a substituição da areia resultou em um aumento da resistência. A substituição parcial da areia por pó de pedras pode ser vantajosa em termos de resistência mecânica, além de potencialmente reduzir custos e promover a sustentabilidade ao utilizar um subproduto da produção de agregados. Recomenda-se a realização de estudos adicionais para entender melhor o comportamento das argamassas com diferentes proporções de pó de pedras e investigar outros parâmetros mecânicos e de durabilidade. Esses resultados fornecem insights valiosos sobre a viabilidade de utilizar pó de pedras em argamassas, contribuindo para práticas mais sustentáveis na construção civil.

4.3.4 Ensaio de absorção capilar

O ensaio de absorção por capilaridade seguiu as recomendações da NBR 15259 (ABNT, 2012), onde os corpos de prova prismáticos foram posicionados a uma altura de 5 mm em lâmina de água, sendo todos os corpos de prova pesados inicialmente secos, após 10 minutos, 30 minutos, 90 minutos e após 14 horas (840 minutos). A figura 28 relata o comportamento da absorção por capilaridade da proporção de referência.

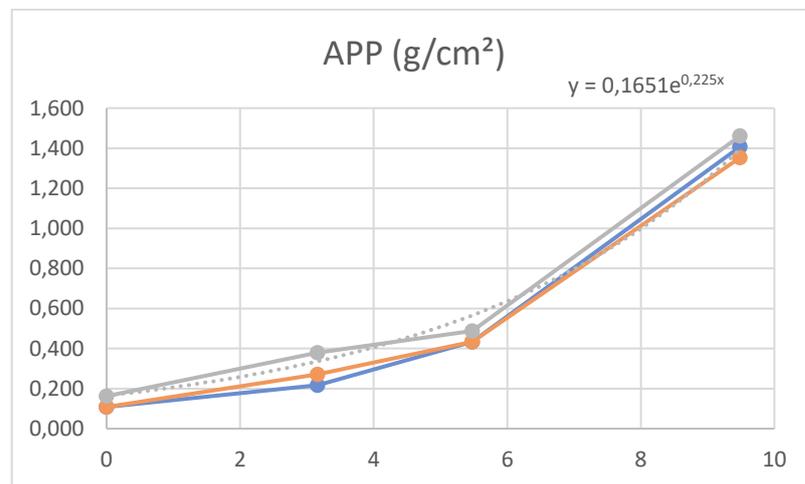
Figura 28 – Absorção por capilaridade REF



Fonte: Autor (2024)

A argamassa de referência apresentou um comportamento de absorção entre 0,09 g/cm² nos primeiros 10 minutos e atingiu um total de 1,7 g/cm² após 14 horas, tendo uma linha de tendência média composta pela equação $y = 0,1091e^{0,2667x}$. O comportamento global da argamassa de referência serviu para parametrizar as comparações com as demais argamassas, facilitando a compreensão do comportamento dos materiais. A figura 29 retrata o comportamento da argamassa com adição de pó de pedras.

Figura 29 – Absorção por capilaridade APP

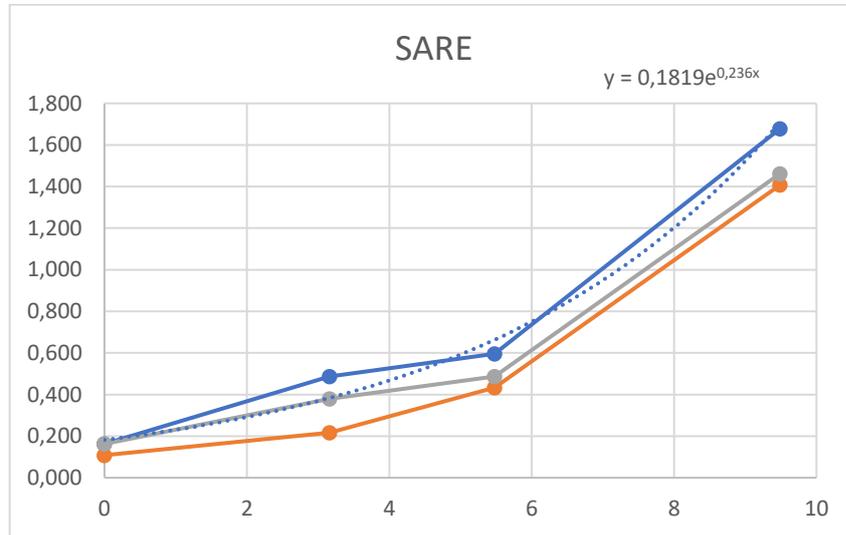


Fonte: Autor (2024)

A argamassa com adição de pó de pedra na proporção de 10% incrementou em 40% a absorção inicial da argamassa, sendo observada uma absorção de 0,126 g/cm² em 10 minutos de ensaio até 1,4 g/cm² após 14 horas de ensaio. Traçando uma linha de tendência média entre os resultados, obtendo a equação de representação $y = 0,1651e^{0,225x}$. Apesar de inicialmente apresentar uma maior absorção, após 90 minutos de ensaio o material teve uma leve tendência de absorção, obtendo limites superiores abaixo da argamassa de referência. O gráfico presente

na figura 30 relata os resultados do ensaio de absorção por capilaridade da substituição da areia por resíduo em 10%.

Figura 30 – Absorção por capilaridade SARE

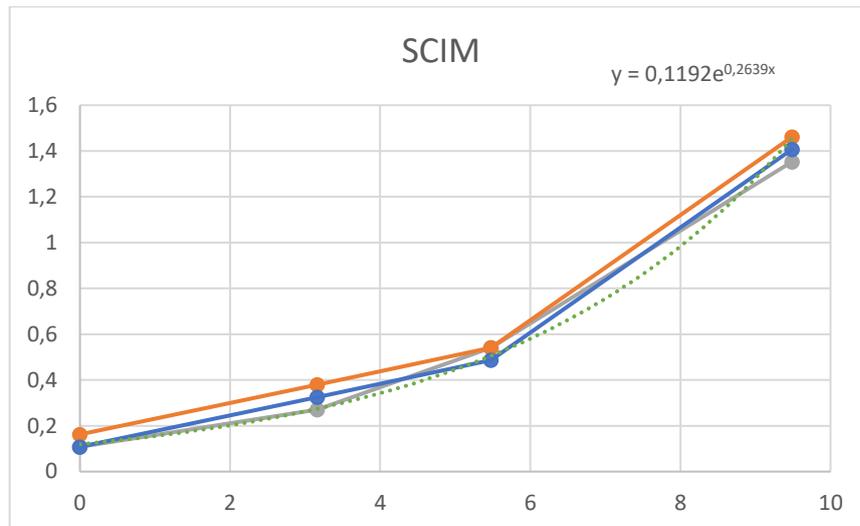


Fonte: Autor (2024)

Comparando a substituição da areia com a argamassa de referência, observamos que há uma semelhança nas propriedades de absorção ascendente das argamassas. Constatou-se um aumento de 5,8% na absorção inicial a 10 minutos com 0,124 g/cm² e 1,678 g/cm² após 14 horas do ensaio. Na análise gráfica, traçando uma linha de tendência média entre as argamassas podemos observar uma equação de representação, onde $y = 0,1819e^{0,236x}$. Durante o ensaio, pôde-se observar que todos os corpos de prova possuíam um comportamento semelhante quanto a textura e umidade superficial presente nas faces dos prismas. Outra observação relevante está relacionada a comparação com a argamassa de referência quanto a resistência superficial durante o lixamento do corpo de prova, ambas apresentaram considerável resistência e durante o ensaio de absorção, obtiveram cotas de umidade consideravelmente equidistantes, fundamentando as benfeitorias relacionadas a substituição da areia pelo resíduo.

Em relação ao cimento, a figura 31 demonstra os resultados gráficos das argamassas produzidas com a substituição de 10% de cimento pelo resíduo de pó de pedras.

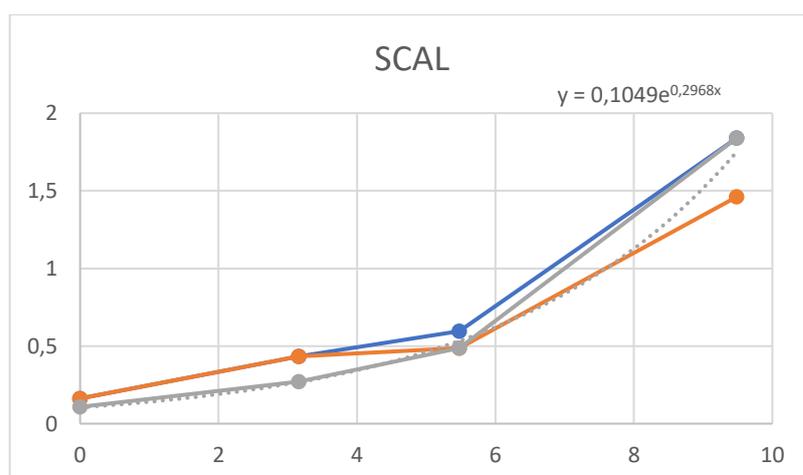
Figura 31 – Absorção por capilaridade SCIM



Fonte: Autor (2024)

A hipótese inicial acerca da substituição do cimento por resíduo promoveria um aumento na absorção capilar. Contraditoriamente a SCIM promoveu uma redução na absorção, iniciando com absorções de 0,108 g/cm² em 10 minutos, com limite de 1,46 g/cm² após 14 horas de ensaio. A fim de facilitar o entendimento do comportamento do material, traçou-se uma linha de tendência com equação $y = 0,1192e^{0,2639x}$. Uma consideração importante está relacionada a quantidade de finos presente no resíduo, que preenche os poros da argamassa e reduz a sua absorção por capilaridade. Divergindo do cimento, a figura 32 esboça os resultados da substituição do resíduo pela Cal hidratada.

Figura 32 – Absorção por capilaridade SCAL



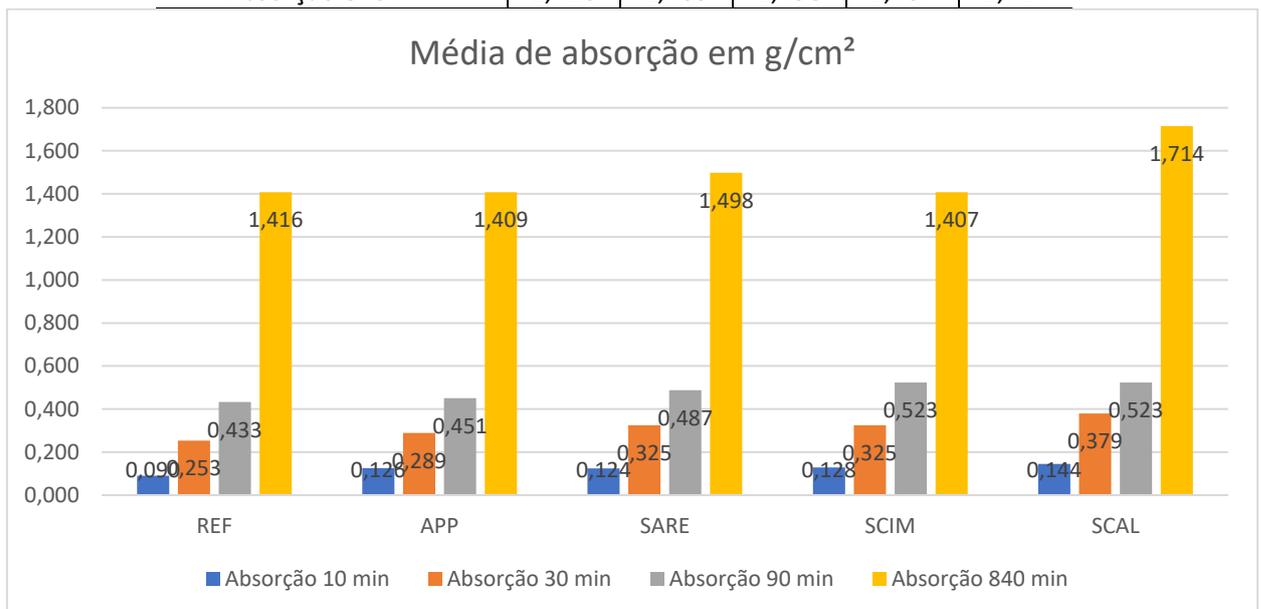
Fonte: Autor (2024)

Dentre as comparações, a substituição do pó de pedras pela cal hidratada apresentou resultados com elevadíssimas absorções, partindo de 0,16 g/cm² em 10 minutos de ensaio e atingindo patamares de 1,8 g/cm² após 14 horas. Comparando com a argamassa de referência, houve um

aumento inicial de 77,7% e 10,1% na finalização do ensaio. Além disso, a textura superficial da argamassa apresenta aspecto poroso, facilitando a absorção de água e podendo ser um fator determinante nas propriedades obtidas no ensaio. A análise gráfica relatou uma equação de tendência média $y = 0,1049e^{0,2968x}$, onde a equação demonstra um maior expoente, característica de elevação acentuada em relação as demais argamassas. A tabela 20 reúne todos os valores médios de absorção por capilaridade para cada tipo de argamassa.

Tabela 20 – Valores médios de absorção por capilaridade

Ensaio de capilaridade (g/cm ²)					
	REF	APP	SARE	SCIM	SCAL
Absorção 10 min	0,090	0,126	0,124	0,128	0,144
Absorção 30 min	0,253	0,289	0,325	0,325	0,379
Absorção 90 min	0,433	0,451	0,487	0,523	0,523
Absorção 840 min	1,416	1,409	1,498	1,407	1,714



Fonte: Autor (2024)

Analisando globalmente os resultados médios das absorções, observamos uma elevada absorção das argamassas produzidas com a substituição da cal hidratada pelo resíduo de pó de pedras, sendo essa a única proporção que divergiu de um padrão constante entre as demais argamassas. A substituição da areia, que apresentou considerável resistência mecânica, possui uma maior absorção na ordem de 5,8%. As demais argamassas possuem comportamento uniforme, seguindo os mesmos parâmetros e comportamentos semelhantes aos da argamassa de referência.

Capítulo 5

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante dos resultados obtidos, destacam-se algumas características importantes para a inserção do pó de pedra, como o aumento da resistência à compressão e melhorias nas propriedades do material no estado fresco. Essas melhorias são influenciadas pelas particularidades do agregado miúdo utilizado e pelas características específicas do pó de pedra.

As análises relatam que em relação a resistência a compressão, a utilização de 10% do resíduo não difere da proporção de referência, sem o material. Apenas pode-se observar um incremento na resistência na proporção de substituição pela areia, caracterizando como uma alternativa viável quando as argamassas forem utilizadas em regiões que necessitam de uma maior resistência à compressão. Tratando de resistência à compressão, em comparação dos corpos de prova prismáticos com os cilíndricos, observou-se um aumento de 37% nas resistências de todas as argamassas, fator caracterizado pela melhor superfície de contato dos CPs prismáticos que beneficia a representação da realidade das argamassas.

A resistência a tração na flexão relatou que assim como na resistência à compressão, as argamassas de substituição de 10% de areia por resíduo possuem uma maior resistência. Outro fator observado no ensaio é que quando há a redução da proporção de aglomerante, seja aéreo ou hidráulico, também há uma redução da resistência à tração. Podendo ter o entendimento de que a diminuição do aglomerante fragiliza as ligações entre os agregados, abrandando a resistência do material.

Os ensaios de absorção por capilaridade relatam um comportamento uniforme entre os materiais, tendo os seus coeficientes de absorção na ordem de 1,45 g/cm² após 14 horas e 0,12 g/cm² após 10 minutos de ensaio. As proporções de substituição da cal hidratada demonstram um aumento de 77% da absorção capilar, dado relevante na aplicabilidade do material. Os ensaios de absorção são relevantes nos diversos empregos, seja na argamassa de assentamento, revestimento de pisos e tetos, regularização, proteção mecânica de sistemas de impermeabilização, entre outros. Uma das alternativas para a manifestação patológica do tipo umidade ascensional é aditivar as argamassas com polímeros impermeabilizantes. Entretanto, a utilização de argamassas com baixos índices de absorção capilar pode emergir como uma alternativa viável para a prevenção de dada anomalia.

Em relação às análises químicas, o resíduo beneficiou o composto cimentício, pois a depender de sua formação geológica, pode melhorar a qualidade química do material e reduzir a possibilidade de contaminantes, devido às suas propriedades controladas e consistentes. O pó de pedra, sendo um subproduto do processo de britagem, geralmente apresenta uma granulometria uniforme e uma composição química estável, o que contribui para uma mistura

mais homogênea e previsível. Além disso, a utilização deste material pode ajudar a reduzir impurezas, uma vez que o processo de britagem frequentemente elimina materiais indesejados. Dessa forma, o uso de pó de pedra não só melhora as propriedades mecânicas, como a resistência à compressão, mas também potencializa a qualidade geral da argamassa, tornando-a mais confiável e durável.

De forma geral, as argamassas de substituição e adição apresentam um comportamento uniforme, tanto nas propriedades químicas, quanto nas características mecânicas, sendo um material que facilmente podem ser empregados no assentamento de blocos cerâmicos ou concreto para alvenarias autoportantes, regularização de pisos, tratamento de fissuras passivas, revestimentos, entre outros. Entretanto, recomenda-se a realização de ensaios complementares para aplicações específicas, como argamassas de emboço para fachadas em revestimento cerâmico, reparos estruturais e medidas profiláticas na construção civil.

5.1 Sugestões de trabalhos futuros

A utilização de resíduos de pó de pedra em argamassas, seja na adição ou substituição é um tema bastante amplo, pois considerando que o resíduo possui uma variação considerável em sua granulometria e formação geológica, os materiais fornecerão características microestruturais e mecânicas distintas sua composição. Assim, acredita-se que os temas sugeridos a seguir, dentre outros relevantes, sejam de grande relevância para a continuidade do desenvolvimento de revestimentos com adição de resíduos de pó de pedra.

1. Investigar o comportamento de proporções de 5%, 10%, 15%, 20% e 50% de substituição da areia nas argamassas;
2. Realizar um estudo de viabilidade econômica sobre a aplicação de argamassas com adição de resíduos para revestimentos de fachadas;
3. Avaliar as aplicações de argamassas com resíduos de pó de pedra para revestimentos de fachadas através de ensaios de arrancamento, ultrassom, módulo de elasticidade e absorção por capilaridade;
4. Investigar a porosidade e elevada absorção por capilaridade das argamassas produzidas com a substituição da cal hidratada;
5. Identificar as causas relacionadas ao incremento de densidade das argamassas produzidas com a substituição dos resíduos sólidos;
6. Investigar o desempenho e durabilidade de revestimentos argamassados produzidos com resíduos de pó de pedras;
7. Investigar se há variações de comportamentos caso o resíduo seja peneirado e aplicado com granulometria uniforme.

REFERÊNCIAS

ABBAS, A.; FATHIFAZL, G.; ISGOR, O. B.; RAZAQPUR, A. G.; FOURNIER, B.; FOO, S. Durability of recycled aggregate concrete designed with equivalent mortar volume method. **Cement and Concrete Composites**, v. 31, n. 8, p. 555–563, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.02.012>>.

ABBAS, Y. M. Simplex-lattice strength and permeability optimization of concrete incorporating silica fume and natural pozzolan. **Construction and Building Materials**, v. 168, p. 199–208, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.144>>.

AGHILLOTF, M.; PALASSI, M.; RAMEZANIANPOUR, A. M. Mechanical and durability assessment of unconfined recycled concrete aggregates and natural aggregates used in road constructions. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 22, n. 12, p. 1518–1530, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/10298436.2019.1701190>>.

ALDUCIN-OCHOA, J. M.; MARTÍN-DEL-RÍO, J. J.; TORRES-GONZÁLEZ, M.; FLORES-ALÉS, V.; HERNÁNDEZ-CRUZ, D. Performance of mortars based on recycled glass as aggregate by accelerated decay tests (ADT). **Construction and Building Materials**, v. 300, p. 124057, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124057>>.

ALI, B.; RAZA, S. S.; KURDA, R.; ALYOUSEF, R. Synergistic effects of fly ash and hooked steel fibers on strength and durability properties of high strength recycled aggregate concrete. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 168, n. January, p. 105444, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105444>>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 43**: Cimento Portland - Determinação da pasta de consistência normal, Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 30**: Agregado miúdo - Determinação da absorção de água, Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45**: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios, Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente, Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 65**: Cimento Portland - Determinação do tempo de pega, Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica, Rio de Janeiro, 2003

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5732**: Cimento Portland comum, Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5735**: Cimento Portland de alto-forno, Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5736:** Cimento Portland Pozolânico, Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6136:** Blocos vazados de concreto simples para alvenaria — Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7175:** Cal hidratada CH I para argamassas - Requisitos, Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7200:** Execução de revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Procedimento, Rio de Janeiro, 1998

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211:** Agregados para concreto – Especificação, Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9202:** 0,044 mm (n° 325) - Método de ensaio, Rio de Janeiro, 1985.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11578:** Cimento Portland composto - Especificação, Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11579:** Cimento Portland — Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (n° 200), Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura por meio da peneira, Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11582:** Cimento Portland — Determinação da expansibilidade Le Chatelier, Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12118:** Blocos vazados de concreto simples para alvenaria — Métodos de ensaio, Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13749:** Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Especificação, Rio de Janeiro, 2013.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279:** Resistência à tração na flexão e compressão, Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13280:** Densidade de massa aparente, Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13528:** Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Determinação da resistência de aderência à tração, Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13749**:Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Especificação, Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15258**: Resistência de aderência à tração, Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15894-1**:Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta Parte 1: Requisitos, Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: Cimento Portland – Requisitos, Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13278**: **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado**.Rio de Janeiro. 2020.

BELTRÁN, M. G.; AGRELA, F.; BARBUDO, A.; AYUSO, J.; RAMÍREZ, A. Mechanical and durability properties of concretes manufactured with biomass bottom ash and recycled coarse aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 72, p. 231–238, 2014.

BEZERRA, A. A. A. dos S.; BARBOSA, A. A. C. D.; BARBOSA, A. A. C. D.; VELOSO, A. A.; SANTOS, L. P. Estudo De Viabilidade Da Utilização Do Resíduo Do Pó De Pedra Como Agregado Miúdo Em Concreto. **Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental**, p. 1–10, 2017.

BOUARROUDJ, M. E.; REMOND, S.; MICHEL, F.; ZHAO, Z.; BULTEEL, D.; COURARD, L. Use of a reference limestone fine aggregate to study the fresh and hard behavior of mortar made with recycled fine aggregate. **Materials and Structures**, v. 52, n. 1, p. 18, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1617/s11527-019-1325-1>>.

BUTLER, L.; WEST, J.; TIGHE, S. Effect of recycled concrete aggregate properties on mixture proportions of structural concrete. **Transportation Research Record**, n. 2290, p. 105–114, 2012.

CALDAS, C.; ROSA, N. Previsão da geração de resíduos na construção civil por meio da modelagem BIM. p. 157–176, 2020.

CORINALDESI, V. Mechanical and elastic behaviour of concretes made of recycled-concrete coarse aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 9, p. 1616–1620, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.02.031>>.

DUARTE, G. L. B.; DA SILVA, B. J.; MARTINS, B. H. R.; CASALI, J. M.; BETIOLI, A. M. Influência da composição de agregado miúdo de rio e proveniente do processo de britagem em argamassas autoadensáveis. **Revista Materia**, v. 27, n. 2, 2022.

ETXEBERRIA, M.; VÁZQUEZ, E.; MARÍ, A.; BARRA, M. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 37, n. 5, p. 735–742, 2007.

GARG, N.; SHRIVASTAVA, S. A review on utilization of recycled concrete aggregates (RCA) and ceramic fines in mortar application. **Materials Today: Proceedings**, v. 73, p. 64–73, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.09.226>>.

GHONEIM, M.; YEHIA, A.; YEHIA, S.; ABUZOID, W. Shear strength of fiber reinforced recycled aggregate concrete. **Materials**, v. 13, n. 18, 2020.

GOMES, A.; CRISTINA, R.; LINTZ, C.; GACHET, L. A. Thermal performance of mortars with rubber waste. p. 423–431, 2020.

GÜNEYISI, E.; GESOGLU, M.; AZEZ, O. A.; ÖZ, H. Ö. Effect of nano silica on the workability of self-compacting concretes having untreated and surface treated lightweight aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 115, p. 371–380, 2016.

HANIF, I. M.; NOOR SYUHAILI, M. R.; HASMORI, M. F.; SHAHMI, S. M. Effect of nylon fiber on mechanical properties of cement based mortar. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 271, n. 1, 2017.

KANAN, M. I. **Manual de Conservação e Intervenção em Argamassas e Revestimentos à Base de Cal**. [s.l.: s.n.]168 p.

KANNAM, P.; RAO SARELLA, V.; KUMAR PANCHARATHI, R. Influence of Recycled Aggregate on Shear Behavior of Steel Fibrous SCC. **Journal of Materials and Engineering Structures**, v. 5, p. 185–205, 2018.

KAPOOR, K.; SINGH, S. P.; SINGH, B. Durability of self-compacting concrete made with Recycled Concrete Aggregates and mineral admixtures. **Construction and Building Materials**, v. 128, p. 67–76, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.026>>.

KHOURY, E.; AMBRÓS, W.; CAZACLIU, B.; SAMPAIO, C. H.; REMOND, S. Heterogeneity of recycled concrete aggregates, an intrinsic variability. **Construction and Building Materials**, v. 175, p. 705–713, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.163>>.

LENTZ, L. C.; ANTUNES, E. G. P. Análise da influência da reposição parcial de mineralagregado por pó de rocha basáltica na produção de argamassa colante industrializada. **Materiales de Construcción**, v. 71, n. 341, 2021.

LIMA, D. A. D. de. **Obtenção E Caracterização De Argamassas De Revestimento Produzidas Com Resíduos De Construção E Demolição (Rcd) Como Agregado Reciclado**. 2022.

LIN, K. L.; CHEN, B. Y.; CHIOU, C. S.; AN CHENG. Waste brick's potential for use as a pozzolan in blended Portland cement. **Waste Management and Research**, v. 28, n. 7, p. 647–652, 2010.

LIU, Q.; XIAO, J.; SUN, Z. Experimental study on the failure mechanism of recycled concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 10, p. 1050–1057, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.06.007>>.

LIU, X.; RONG, Y.; CHEN, X.; CHEN, X.; ZHANG, W. Recycling of Waste Stone Powder in High Fluidity Grouting Materials for Geotechnical Engineering Reinforcement. **Buildings**, v. 12, n. 11, 2022.

MENEZES, S. D. S.; PAIVA, W. de; SANTOS, L. L. dos; LIMA, R. A. de; SILVA, R. A. F. da; MARTILDES, J. A. L.; SILVA, A. F.; PEQUENO, O. T. B. de L. Análise De Parâmetros Para Argamassa Com Substituição Parcial Do Aglomerante Por Resíduo Industrial De Granito. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 8, p. 63729–63743, 2020.

MENOSSE, R. T. **Utilização do pó de pedra basáltica em substituição à areia natural do concreto**. 2004. 2004. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/90740>>.

MOHAMMED, S. I.; NAJIM, K. B. Mechanical strength, flexural behavior and fracture energy of Recycled Concrete Aggregate self-compacting concrete. **Structures**, v. 23, n. September 2019, p. 34–43, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.09.010>>.

MOSER, N. J. **AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA EM COMPÓSITOS DE ARGAMASSA COM ADIÇÃO DE PÓ DE VIDRO APÓS EXPOSIÇÃO A ELEVADAS TEMPERATURAS**. 2019. 2019.

MUKRIMAA, S. S.; NURDYANSYAH; FAHYUNI, E. F.; YULIA CITRA, A.; SCHULZ, N. D.; د. غسان; TANIREDDA, T.; FARIDLI, E. M.; HARMIANTO, S. World Population Prospects The 2017 Revision. **Jurnal Penelitian Pendidikan Guru Sekolah Dasar**, v. 6, n. August, p. 128, 2016.

NACERI, A.; HAMINA, M. C. Use of waste brick as a partial replacement of cement in mortar. **Waste Management**, v. 29, n. 8, p. 2378–2384, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2009.03.026>>.

NAVARINI KURZ, M.; MARINI BRANDELLI, T.; MARCELO PALIGA, C.; DA SILVA TORRES, A. Argamassa com resíduo de borracha: Propriedades físicas e mecânicas. **Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade**, v. 5, n. 1, p. 9, 2018.

NOBREGA, A. K. C.; SÁ, M. V. V. A. de; AMARAL, R. A.; GOIS, S. E.; DANTAS, G. M. Caracterização Do Resíduo De Pó De Pedra Ornamental Adicionado À Argamassa Em Substituição Parcial Ao Cimento. p. 13172–13179, 2015.

O'FARRELL, M.; SABIR, B. B.; WILD, S. Strength and chemical resistance of mortars containing brick manufacturing clays subjected to different treatments. **Cement and Concrete Composites**, v. 28, n. 9, p. 790–799, 2006.

OLOFINNADE, O. M.; EDE, A. N.; NDAMBUKI, J. M.; BAMIGBOYE, G. O. Structural properties of concrete containing ground waste clay brick powder as partial substitute for cement. **Materials Science Forum**, v. 866, p. 63–67, 2016.

PACHECO, J.; DE BRITO, J.; CHASTRE, C.; EVANGELISTA, L. Experimental investigation on the variability of the main mechanical properties of concrete produced with coarse recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 201, p. 110–120, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.200>>.

PICKEL, D.; TIGHE, S.; WEST, J. S. Assessing benefits of pre-soaked recycled concrete aggregate on variably cured concrete. **Construction and Building Materials**, v. 141, p. 245–252, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.140>>.

PIMENTEL, M. G.; BORGES, J. P. das C.; PICANÇO, M. de S.; GHAVAMI, K. Resposta à flexão e análise de tenacidade de argamassas reforçadas com fibra de Curauá. **Revista Materia**, v. 21, n. 1, p. 18–26, 2016.

QURESHI, L. A.; ALI, B.; ALI, A. Combined effects of supplementary cementitious materials (silica fume, GGBS, fly ash and rice husk ash) and steel fiber on the hardened properties of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 263, n. 2020, p. 120636, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120636>>.

ROESLER, J.; LANGE, D.; SALAS, A.; BRAND, A.; ARBOLEDA, C. Properties of recycled concrete aggregates for airfield rigid pavements. n. 34, p. 1–98, 2013. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/2142/45894>>.

SALGADO, F. de A.; SILVA, F. de A. Properties of recycled aggregates from different composition and its influence on concrete strength. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 14, n. 6, p. 1–16, 2021.

SANTIAGO, C. C. **Argamassas tradicionais de cal**. Salvador: 2007, 2007. 202 p.

SANTOS, R. A. dos; LIRA, B. B.; RIBEIRO, A. C. M. Argamassa Com Substituição De Agregado Natural Por Resíduo De Britagem De Granito. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 8, n. 8, p. 1818–1828, 2013.

STREB, FELIPE POHL; GAUER, E. A. Efeitos Da Substituição Do Agregado Miúdo Por Effects of Replacing the Fine Aggregate With. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 14, p. 104–115, 2022.

SU, Q. Strengths of recycled concrete added with steel fiber. **Archives of Civil Engineering**, v. 66, n. 3, p. 693–703, 2020.

THOMAS, J.; THAICKAVIL, N. N.; WILSON, P. M. Strength and durability of concrete containing recycled concrete aggregates. **Journal of Building Engineering**, v. 19, n. March, p. 349–365, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.05.007>>.

TURI GERIN, M.; SALES, A.; DE NARDIN, S. Mechanical and Physical Properties of Recycled Aggregates Concrete. **Revista Tecnológica**, v. 29, n. 1, p. 259–274, 2020.

VERIAN, K. P.; ASHRAF, W.; CAO, Y. Properties of recycled concrete aggregate and their influence in new concrete production. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 133, n. October 2017, p. 30–49, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.02.005>>.

XIAO, J.; LI, W.; CORR, D. J.; SHAH, S. P. Effects of interfacial transition zones on the stress-strain behavior of modeled recycled aggregate concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 52, p. 82–99, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.05.004>>.

XIAO, J.; WANG, W.; ZHOU, Z.; TAWANA, M. M. Punching shear behavior of recycled aggregate concrete slabs with and without steel fibres. **Frontiers of Structural and Civil Engineering**, v. 13, n. 3, p. 725–740, 2019.

ZHAO, Z.; COURARD, L.; GROSLAMBERT, S.; JEHIN, T.; LÉONARD, A.; XIAO, J. Use of recycled concrete aggregates from precast block for the production of new building blocks: An industrial scale study. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 157, n. February, p. 104786, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104786>>.