



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

WAGNER DUTRA DA SILVA

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES E DURABILIDADE DE ARGAMASSAS
COMPOSTAS POR RESÍDUOS SUSTENTÁVEIS DO MUNICÍPIO DE
CARAÚBAS-RN**

CARAÚBAS/RN

2024

WAGNER DUTRA DA SILVA

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES E DURABILIDADE DE
ARGAMASSAS COMPOSTAS POR RESÍDUOS SUSTENTÁVEIS DO
MUNICÍPIO DE CARAÚBAS-RN**

Monografia apresentada a
Universidade Federal Rural do Semi-
Árido como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Ciência e
Tecnologia.

Orientador: Prof. Me. Glauco
Fonsêca Henriques

CARAÚBAS/RN

2024

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

S586a Silva, Wagner Dutra da.
Avaliação das propriedades e durabilidade de
argamassas compostas por resíduos sustentáveis do
município de Caraúbas-RN / Wagner Dutra da Silva. -
2024.
69 f. : il.

Orientador: Glauco Fonsêca Henriques.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e
Tecnologia, 2024.

1. compósitos cimentícios. 2. capilaridade. 3.
ciclos de molhagem e secagem. 4. ciclos de
variação de temperatura. 5. sustentabilidade. I.
Henriques, Glauco Fonsêca , orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Biblioteca Campus Caraúbas
Bibliotecária: Dalvanira Brito Rodrigues
CRB: 15/700

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

WAGNER DUTRA DA SILVA

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES E DURABILIDADE DE ARGAMASSAS
COMPOSTAS POR RESÍDUOS SUSTENTÁVEIS DO MUNICÍPIO DE CARAÚBAS-
RN**

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como requisito
para obtenção do título de Bacharel em Ciência
e Tecnologia.

Defendida em: 23 / 10 / 2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Glauco Fonsêca Henriques (UFERSA)
Presidente

Prof. Dr. Gilvan Bezerra dos Santos Junior (UFERSA)
Membro Examinador

Prof (a). Dr (a) Edna Lucia da Rocha Linhares. (UFERSA)
Membro Examinadora

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, quero expressar minha gratidão a Deus, pela dádiva da vida, que me sustenta em cada passo dessa jornada. Em seguida, à minha família, em especial aos meus pais, Francisco das Chagas e Marta Raniere, que são pilares fundamentais na minha vida. Eles não apenas me incentivaram a trilhar o caminho da educação, mas também, com muito amor e dedicação, fizeram tudo ao seu alcance para me proporcionar uma formação de qualidade, sempre me inspirando a ser uma pessoa íntegra.

Minha irmã, Viviane Dutra, merece um reconhecimento especial, por seu apoio incansável, por sempre estar ao meu lado, oferecendo ajuda sem jamais medir esforços. Sua presença foi essencial em cada etapa desse percurso.

Agradeço imensamente às minhas amigas e colegas de pesquisa e de curso, Bruna Gabriela e Emanuela Ieda, que juntos, compartilhamos desafios, aprendizados e muitas lições. Seu apoio, suas críticas construtivas e a constante disponibilidade para me ajudar tornaram esse caminho mais leve e enriquecedor. Não posso deixar de estender meus agradecimentos também a todos os colegas de curso, que se tornaram grandes amigos ao longo dessa trajetória.

Um agradecimento especial ao meu orientador, Prof. Me. Glauco Fonsêca Henriques, que, além de compartilhar sua vasta experiência e conhecimento, sempre se mostrou disponível, atencioso e dedicado em cada orientação. Sua paciência e comprometimento foram diferenciais que impactaram profundamente a realização desta pesquisa, e por isso sou eternamente grato.

Por fim, gostaria de agradecer aos meus amigos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para o meu crescimento acadêmico e pessoal. Aos amigos da minha cidade, em especial, obrigado pela parceria, pelo apoio contínuo e pelas motivações que me impulsionaram ao longo do curso.

“Esforce-se para não ser um sucesso, mas sim para ser valioso”

Albert Einstein.

RESUMO

Com o crescimento da Construção Civil, que desempenha um papel fundamental na infraestrutura e no bem-estar da sociedade, surge a preocupação com o consumo excessivo de recursos naturais que tem se tornado cada vez mais relevante. O uso desmedido de agregados e a grande geração de resíduos sem destinação final apropriada, além da alta produção de CO₂ na fabricação de cimentos, tem apresentado riscos significativos tanto para o meio ambiente quanto para a população. Diante desse cenário, esta pesquisa teve como objetivo avaliar o comportamento físico-mecânico de argamassas com a incorporação de resíduos provenientes da construção civil que tenham um grande potencial para substituir tanto o cimento como o agregado miúdo na produção de argamassas. Após 28 dias, foram realizados ensaios não destrutivos nas argamassas, analisando a densidade de massa no estado endurecido e a absorção de água por capilaridade. Os ensaios destrutivos incluíram ciclos de molhagem e secagem, variação de temperatura, resistência à compressão e tração por compressão diametral. As argamassas com resíduos de PGM se destacaram, com densidades de 1,98 g/cm³ e 1,96 g/cm³, e coeficientes de capilaridade de 0,83 e 0,86 g/cm². Quanto a resistência à compressão, o resíduo da construção e demolição (RCD), apresentou boa resistência após as variações climáticas e o pó de granito e mármore (PGM) substituindo o agregado, uma excelente resistência inicial com 12,47 MPa. A elevação na resistência após os ciclos térmicos foi notável nas amostras de resíduos da cerâmica vermelha (RCV) e resíduos da construção e demolição (RCD) que substituem o agregado. Os ensaios de tração por compressão diametral evidenciaram que o uso de RCD como substituição parcial do cimento em 10% é mais eficaz do que PGM e o RCV. Além disso, as substituições de agregados em 25% por resíduos aumentaram a resistência das argamassas.

Palavras-chave: compósitos cimentícios; capilaridade; ciclos de molhagem e secagem; ciclos de variação de temperatura; sustentabilidade.

ABSTRACT

With the growth of the Construction Industry, which plays a fundamental role in the infrastructure and well-being of society, concerns about excessive consumption of natural resources have become increasingly relevant. The uncontrolled use of aggregates and the large amount of waste generated without proper final disposal, in addition to high CO₂ production in cement manufacturing, pose significant risks to both the environment and the population. In this context, this research aimed to evaluate the physical-mechanical behavior of mortars with the incorporation of construction waste that has high potential to replace both cement and fine aggregate in mortar production. After 28 days, non-destructive tests were carried out on the mortars, analyzing the hardened state density and water absorption by capillarity. Destructive tests included wetting and drying cycles, temperature variation, compressive strength, and tensile strength by diametral compression. The mortars with granite and marble powder (PGM) residues stood out, with densities of 1.98 g/cm³ and 1.96 g/cm³, and capillarity coefficients of 0.83 and 0.86 g/cm². Regarding compressive strength, construction and demolition waste (RCD) showed good strength after climate variations, and granite and marble powder (PGM) as an aggregate replacement demonstrated excellent initial strength at 12.47 MPa. The increase in strength after thermal cycles was notable in the samples of red ceramic waste (RCV) and construction and demolition waste (RCD) replacing the aggregate. The tensile strength by diametral compression tests showed that using RCD as a 10% partial replacement of cement is more effective than PGM and RCV. Additionally, the 25% aggregate replacements with waste increased the strength of the mortars.

Keywords: cementitious composites; capillarity; wetting and drying cycles; temperature variation cycles; sustainability

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxograma das Etapas e Procedimentos Realizados nos Materiais	21
Figura 2: Fluxograma das Etapas e Procedimentos Realizados nas Argamassas	22
Figura 3: Cimento Portland	23
Figura 4: Pó de Pedra	24
Figura 5: Pó de Granito e Mármore.....	25
Figura 6: Resíduos de Cerâmica Vermelha	25
Figura 7: Resíduos da Construção e Demolição	26
Figura 8: Massa Específica.....	27
Figura 9: Massa Unitária	28
Figura 10: Conjunto de Peneiras	29
Figura 11: Ensaio de Consistência	31
Figura 12: Exemplo de Gráfico da Relação Água/Aglomerante.....	32
Figura 13: Moldagem e Desmoldagem dos CP's.....	33
Figura 14: Absorção por Capilaridade	34
Figura 15: Processo de Molhagem e Secagem.....	35
Figura 16: Processo de Variação de Temperatura.....	37
Figura 17: Tração Por Compressão Diametral	38
Figura 18: Resistência a Compressão.....	39
Figura 19: Massa Específica e Massa Unitária dos Resíduos	40
Figura 20: Composição Química dos Resíduos	43
Figura 21: DRX do Pó de Granito e Mármore	45
Figura 22: DRX do Resíduo da Cerâmica Vermelha	46
Figura 23: DRX do Resíduo da Construção e Demolição.....	46
Figura 24: Granulometria dos Resíduos	48
Figura 25: Granulometria do Pó de Pedra	49
Figura 26: Granulometria do Resíduo da Construção e Demolição.....	50
Figura 27: Granulometria do Pó de Granito e Mármore	51
Figura 28: Granulometria do Resíduo de Cerâmica Vermelha	52
Figura 29: Massa Específica das Argamassas no Estado Fresco	53
Figura 30: Absorção por Capilaridade	54
Figura 31: Densidade de Massa no Estado Endurecido	55
Figura 32: Resultados da Resistência a Compressão	56

Figura 33: Tração por Compressão Diametral	58
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Nomenclatura das Argamassas e Suas Composições	30
Tabela 2: Consumo de Materiais	31
Tabela 3: Composição Química dos Resíduos	43
Tabela 4: Requisitos Químicos para Resíduos Pozolânicos Conforme ABT NBR 12653	44
Tabela 5: Resultados da Compressão Antes e Após os Ciclos.....	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

REF	Referência
PGM	Pó de Granito e Mármore
RCV	Resíduos de Cerâmica Vermelha
RCD	Resíduos da Construção e Demolição
PDP	Pó de Pedra
AGR	Agregado
CP	Corpo de Prova
MF	Módulo de Finura
FRX	Fluorescência de Raios X
DRX	Difração de Raios X
Fc	Resistência à Compressão
Fct,sp	Resistência à Tração Por Compressão Diametral
A/C	Relação Água/Cimento

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVOS	15
2.1. GERAL.....	15
2.2. ESPECÍFICOS	15
3. REFERENCIAL TEÓRICO	16
3.1. ARGAMASSA.....	16
3.1.1. Definição	16
3.1.2. Tipos e Classificações das Argamassas	16
3.1.3. Agregados	17
3.1.4. Cimento Portland.....	18
3.1.5. Tipos e Classificações do Cimento Portland.....	18
3.2. ÁGUA, ADITIVOS E ADIÇÕES	18
3.3. RESÍDUOS REGIONAIS	19
3.4. DURABILIDADE.....	20
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	21
4.1. MATERIAIS	22
4.1.1. Cimento.....	22
4.1.2. PDP	23
4.1.3. PGM	24
4.1.4. RCV	25
4.1.5. RCD	26
4.1.6. Água.....	26
4.2. MÉTODOS.....	27
4.2.1. Caracterização dos Resíduos.....	27
4.2.1.1. Massa Específica e Massa Unitária.....	27
4.2.1.2. Fluorescência de Raios – X.....	28
4.2.1.3. Difração de Raios - X	28
4.2.1.4. Granulometria	29
4.2.2. Produção das Argamassas.....	30
4.2.2.1. Relação Água Cimento.....	31

4.2.2.2. Massa Específica no Estado Fresco	32
4.2.2.3. Moldagem e Desmoldagem dos CP's	32
4.2.3. Ensaaios Não Destrutivos nas Argamassas.....	33
4.2.3.1. Absorção por Capilaridade	33
4.2.3.2. Densidade de Massa no Estado Endurecido	34
4.2.4. Ensaaios Destrutivos nas Argamassas.....	34
4.2.4.1. Ciclos de Molhagem e Secagem.....	34
4.2.4.2. Ciclos de Variação de Temperatura	36
4.2.4.3. Ensaio de Tração por Compressão Diametral.....	37
4.2.4.4. Ensaio de Resistência a Compressão	38
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
5.1. CARACTERIZAÇÃO.....	40
5.1.1. Massa Específica e Massa Unitária	40
5.1.1.1. Pó de Pedra	40
5.1.1.2. Resíduos de Cerâmica Vermelha	41
5.1.1.3. Resíduos da Construção e Demolição	41
5.1.1.4. Pó de Granito e Mármore.....	42
5.1.1.5. Cimento Portland	42
5.1.2. Fluorescência de Raios X.....	42
5.1.3. Difração de Raios – X	45
5.1.4. Granulometria	47
5.1.4.1. Pó de Pedra	48
5.1.4.2. Resíduos da Construção e Demolição	49
5.1.4.3. Pó de Granito e Mármore.....	50
5.1.4.4. Resíduos de Cerâmica Vermelha	51
5.2. PRODUÇÃO DAS ARGAMASSAS.....	52
5.2.1. Massa Específica das Argamassas no Estado Fresco.....	52
5.3. ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS	53
5.3.1. Absorção Por Capilaridade.....	53
5.3.2. Densidade de Massa no Estado Endurecido	55
5.4. ENSAIOS DESTRUTIVOS	55
5.4.1. Resistência a Compressão.....	56
5.4.2. Tração por Compressão Diametral	58

6. CONCLUSÃO	60
REFERÊNCIAS	62

1. INTRODUÇÃO

A Construção Civil vem se tornando uma das áreas de destaque na indústria brasileira, mostrando seu papel no crescimento econômico e social, especialmente nos centros urbanos. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2021), a pesquisa anual da indústria da construção constatou que, entre os anos de 2012 e 2021, o consumo dos materiais nas construções teve um aumento, passando de 36,3% para 38%, respectivamente. Dentre os principais usos das matérias-primas, destaca-se a formação de compostos cimentícios, como argamassas. E a durabilidade das argamassas é um fator crucial, pois afeta diretamente a vida útil das edificações e a necessidade de manutenções ao longo do tempo.

A durabilidade é considerada um elemento crucial na construção civil, sendo tratada com importância comparável a outros aspectos do processo construtivo. Segundo Schmalz (2018), tradicionalmente, a resistência à compressão era destacada como a principal qualidade dessas estruturas de argamassas. No entanto, diante da observação frequente de degradação precoce, surge a necessidade de priorizar a durabilidade como um critério essencial. Para Farias Filho, Rolim e Toledo Filho (2000), os requisitos mínimos que os compósitos cimentícios devem atender são: resistência, durabilidade, desempenho, vida útil, custo do ciclo de vida e sustentabilidade.

A preocupação com a durabilidade e vida útil das argamassas vem sendo incorporada às técnicas de estudos de substituição dos compósitos cimentícios, buscando garantir a integridade das argamassas por mais tempo. Entretanto, problemas relacionados à deterioração prematura de revestimentos ainda persistem atualmente. Mesmo em estruturas relativamente jovens, podem surgir sinais precoces de deterioração, tais como fissuras, trincas, deslocamentos, entre outros (Possan; Demoliner, 2013).

A sustentabilidade ambiental é um tema bastante discutido quando se trata da preservação do meio ambiente. Portanto, a busca pela destinação adequada dos resíduos se torna cada vez mais necessária. O próprio fato de se utilizar resíduos nas argamassas contribui para dar uma destinação final para os mesmos, que antes não tinham, ou até poderiam poluir o meio ambiente, como é o caso muitas vezes dos resíduos da construção civil (RCD).

Recentemente, tem havido um crescente interesse em encontrar soluções que promovam uma produção mais sustentável, priorizando materiais com menor emissão de carbono e com potencial para substituir o Cimento Portland. Nesse sentido, diversos estudos têm se concentrado na incorporação de resíduos nos compósitos cimentícios, seja como materiais de

enchimento ou de natureza pozolânica, visando contribuir para práticas construtivas ecoeficientes e sustentáveis. A substituição do cimento contribui diretamente de forma a reduzir os gastos energéticos e reduzir a pegada de emissão dos gases poluentes no mundo, visto que, na produção do cimento, além do alto consumo de matéria prima, há uma grande geração de gás CO₂. Cerca de 7% a 8% das emissões de CO₂ no mundo são oriundas da produção do cimento Portland (Tavares *et al.*, 2022).

Além disso, a substituição dos agregados contribui para evitar o uso excessivo de matéria-prima natural (areia e brita), podendo-se reutilizar materiais da própria indústria da construção, ou até de outros setores. De acordo com Canedo, Brandão e Peixoto Filho (2011), a incorporação de resíduos na formulação de argamassas pode representar uma solução economicamente viável e tecnicamente aceitável. No entanto, ressalta-se a escassez de estudos mais aprofundados nesse campo.

Portanto, há uma clara indicação da importância de buscar tipos de argamassas que tenham como base o reaproveitamento de resíduos em sua produção, a fim de reduzir o impacto ambiental causado pela sua produção. A reciclagem de resíduos desempenha um papel crucial na proteção e conservação dos recursos naturais não renováveis do nosso planeta, garantindo a satisfação das necessidades atuais da população sem colocar em risco a sobrevivência das futuras gerações, bem como a saúde do próprio ecossistema terrestre (Lucas; Benatti, 2008).

2. OBJETIVOS

2.1. GERAL

O objetivo do trabalho é avaliar o comportamento físico-mecânico de argamassas com a incorporação de resíduos provenientes da construção civil que tenham um grande potencial para substituir tanto o cimento como o agregado miúdo na produção de argamassas.

2.2. ESPECÍFICOS

Este trabalho visa:

- Caracterizar resíduos sólidos regionais, no intuito de reaproveitá-los para produção de argamassas;
- Avaliar as propriedades físicas e a durabilidade das argamassas, nas quais foram incorporados resíduos sólidos regionais em substituição parcial do cimento e agregado;
- Investigar como os testes de durabilidade influenciam as propriedades mecânicas dessas argamassas;
- Analisar e determinar a eficácia dos resíduos na melhoria das propriedades e durabilidade das argamassas e avaliar a viabilidade para uso das argamassas sustentáveis em aplicações específicas na construção civil.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. ARGAMASSA

3.1.1. Definição

A NBR 13281-1 (ABNT, 2023) define argamassa como sendo uma mistura homogênea de agregado(s) miúdo(s), aglomerante(s) inorgânicos e água, contendo ou não aditivos, com características de desempenho adequada a sua utilização. A argamassa é amplamente utilizada na Construção Civil em diversas aplicações, que vão desde o assentamento de alvenaria até o revestimento interno e externo, além da regularização de pisos. Ela também é empregada no assentamento e rejuntamento de revestimentos de cerâmica e pedra, destacando-se como um material fundamental nesse setor (Canedo; Brandão; Peixoto Filho, 2011).

Ao longo dos anos, tem havido uma evolução significativa nas formulações das argamassas, refletindo as mudanças nas práticas de construção. Enquanto as argamassas antigas se baseavam principalmente em cal e areia, as versões mais recentes incorporam uma variedade de materiais, incluindo cimento Portland, aditivos orgânicos e resíduos regionais. Essas adições são frequentemente destinadas a aprimorar características específicas, como a trabalhabilidade do material (Carasek, 2010).

Ainda para Carasek (2010), a trabalhabilidade das argamassas no estado fresco diz respeito à sua capacidade de serem misturadas, transportadas, aplicadas, consolidadas e acabadas de forma homogênea, permitindo ao pedreiro ou aplicador executar seu trabalho com boa produtividade e garantindo que o revestimento apresente o acabamento superficial especificado.

3.1.2. Tipos e Classificações das Argamassas

Segundo Carasek (2010), o revestimento de argamassa pode ser composto por diversas camadas, cada uma com funções e características específicas:

- Chapisco: camada preliminar aplicada de maneira contínua ou descontínua para preparar a superfície. Sua função é uniformizar a absorção de água e melhorar a aderência das camadas subsequentes, além de contribuir para a estanqueidade da vedação.

- Emboço: camada intermediária que cobre a base e proporciona uma superfície adequada para receber outras camadas, como reboco ou revestimentos decorativos, como cerâmica.
- Reboco: camada final aplicada sobre o emboço, criando uma superfície pronta para acabamento decorativo, como pintura, ou funcionando como o acabamento definitivo.
- Camada única: consiste em uma única aplicação de argamassa diretamente sobre a base, seguida por uma camada decorativa, como pintura. Popularmente conhecida como "massa única" ou "reboco paulista", esta técnica é a mais amplamente utilizada no Brasil.
- Revestimento decorativo monocamada (RDM): trata-se de uma solução que combina regularização e acabamento decorativo em uma única aplicação, amplamente utilizada na Europa. A argamassa RDM é um produto industrializado, ainda sem regulamentação no Brasil, cuja composição varia entre fabricantes. Geralmente, contém cimento branco, cal hidratada, agregados diversos, pigmentos inorgânicos, fungicidas e aditivos, como plastificantes, retentores de água, incorporadores de ar e hidrofugantes.

3.1.3. Agregados

Segundo Ribeiro, Pinto e Starling (2002), os 'agregados' constituem um termo amplo referente aos materiais adicionados ao cimento e à água com o propósito de formar argamassas e concretos. Esses materiais, como areias e britas, são granulares e devem ser inertes, não desencadeando reações indesejadas.

De acordo com Bauer (2019) os agregados desempenham um papel crucial na sociedade, sendo essenciais para uma variedade de aplicações na construção civil, desde pavimentação até obras geotécnicas e construções em geral. Eles consistem em materiais granulares com diferentes faixas de tamanho, como os agregados graúdos e miúdos, e são fundamentais para a composição de argamassas.

A NBR 7211 da ABNT (2022) estabelece parâmetros para a granulometria dos agregados, dividindo-os em agregados miúdos e agregados graúdos. Segundo a norma, agregado miúdo é aquele cujos grãos passam pela peneira de 4,75mm e ficam retidos na peneira de 150µm, enquanto agregado graúdo é aquele cujos grãos passam pela peneira de 75mm e ficam retidos na peneira de 4,75mm. Além disso, essa norma também pode ser aplicada para avaliar a granulometria dos agregados miúdos provenientes de resíduos regionais.

3.1.4. Cimento Portland

A norma NBR 16697 (ABNT, 2018) estabelece que o cimento Portland é um ligante hidráulico produzido pela moagem do clínquer Portland, ao qual são adicionadas quantidades adequadas de uma ou mais formas de sulfato de cálcio e adições minerais conforme os teores estabelecidos pelas normas aplicáveis.

Bauer (2019) enfatiza, também, que o cimento Portland é uma mistura complexa de vários componentes, incluindo cal, sílica, alumina, óxido de ferro e magnésia, entre outros. Sua importância reside na influência direta que esses constituintes exercem sobre as propriedades finais do cimento e dos materiais que o constituem. Ao analisar suas propriedades físicas, é crucial considerar três aspectos distintos: sua forma natural em pó, sua reação ao ser misturado com água e sua composição quando combinado com agregados.

3.1.5. Tipos e Classificações do Cimento Portland

Quanto a sua classificação, a norma NBR 16697 (ABNT, 2018) cita que os cimentos Portland são designados por seu tipo, que corresponde a uma série de adições e propriedades especiais. Eles são reconhecidos por suas siglas, seguidas de sua classe de resistência como: 25, 32, 40 ou de alta resistência inicial (ARI), às vezes acompanhadas dos sufixos RS e BC que significa resistente a sulfatos e baixo calor de hidratação, respectivamente. Dentre os tipos de cimento Portland definidos pela norma, estão: Cimento Portland Comum (CP I); Cimento Portland composto por escória granulada de alto forno (CP II-E); Cimento Portland composto por material pozzolânico (CP II-Z); Cimento Portland composto por material carbonático (CP II-F); Cimento Portland de alto forno (CP III); Cimento Portland pozzolânico (CP IV); cimento Portland de alta resistência (CP V) e Cimento Portland branco (CPB).

3.2. ÁGUA, ADITIVOS E ADIÇÕES

Em geral, ao trabalhar com argamassa em uma obra, é comum que o pedreiro tenha como principal meio de ajuste direto a quantidade de água utilizada no amassamento. Isso ocorre porque as proporções dos componentes da argamassa são geralmente pré-determinadas. Portanto, ao adicionar mais ou menos água, o foco principal inicialmente é melhorar a consistência ou fluidez da argamassa. Esta consistência pode variar entre seca, plástica ou

fluida, dependendo da quantidade de pasta aglomerante presente ao redor dos agregados (Carasek, 2010).

Com o progresso tecnológico, novos elementos têm sido introduzidos nos resíduos, como aditivos e adições, com o propósito de aprimorar suas propriedades, tais como torná-lo mais impermeável, reduzir o calor gerado pela hidratação, aumentar sua durabilidade, conferir maior maleabilidade quando fresco, e acelerar o ganho de resistência após a solidificação, dentre outras melhorias (Santos; Real; Lopes, 2018).

Ainda segundo Santos, Real e Lopes (2018), as adições minerais são incorporadas aos compósitos com o propósito de complementar ou substituir parte do cimento Portland. A quantidade ideal dessas adições é determinada através de testes experimentais, visando alcançar os resultados desejados na resistência e durabilidade dos mesmos. A falta ou o excesso dessas adições pode resultar em efeitos adversos ou não proporcionar melhorias significativas no desempenho da mistura

3.3. RESÍDUOS REGIONAIS

O Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, Resolução n.º 307, de 05 de julho de 2002, esclarece que a classificação de resíduos é composta por materiais reutilizáveis ou recicláveis que podem ser utilizados como agregados em diversas aplicações. Isso abrange resíduos provenientes de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e outras obras de infraestrutura, como solos resultantes de terraplanagem. Além disso, engloba resíduos de construção, demolição, reformas e reparos de edificações, como componentes cerâmicos (Brasil, 2002).

Ainda sobre a classificação dos resíduos, de acordo com a norma NBR 15113 (ABNT, 2004), estes resíduos englobam uma ampla variedade de materiais, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concretos em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassas, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações e fiação elétrica. Esses materiais são comumente conhecidos como entulho de obra ou metralha.

Para Soares *et al.* (2019), os compósitos cimentícios são caracterizados pela alta resistência mecânica e pela durabilidade, além da inclusão de materiais cimentícios suplementares, visando a redução do impacto ambiental da produção do cimento Portland. O pó de vidro, por exemplo, é mencionado como um desses materiais suplementares devido à sua

composição rica em sílica amorfa, podendo ser amplamente utilizado como substituto parcial do cimento Portland nos compósitos cimentícios.

3.4. DURABILIDADE

Por sua vez, a durabilidade, conforme definida pela norma NBR 15575-1 (ABNT, 2024), está relacionada à capacidade do material resistir às influências ambientais que são especificadas e acordadas entre o projetista e o contratante no início do processo de elaboração do projeto. Segundo Graeff (2007), a durabilidade dos compósitos cimentícios pode ser afetada por diversos tipos de ambientes agressivos. Com isso, a durabilidade de uma argamassa está intrinsecamente ligada à sua capacidade de resistir a condições climáticas adversas, ataques químicos, abrasão e outros agentes de deterioração.

Ensaio destrutivo como ataque por sulfatos, ciclos de molhagem e secagem e variação de temperatura estão diretamente ligados a durabilidade dos compósitos cimentícios. A deterioração do compósito devido à presença de sulfatos ocorre devido às interações químicas com os elementos hidratados do cimento Portland. Essas reações, ao progredirem, podem resultar na criação de substâncias expansivas, levando à fissuração e desintegração do material (Hoppe Filho *et al*, 2015).

A resistência de um material refere-se à sua habilidade de suportar e resistir às forças externas exercidas sobre ele. No caso específico da argamassa, a resistência mecânica diz respeito à sua capacidade de manter sua integridade e suportar esforços físicos diversos após ter endurecido (Simões; Silva, 2016). A resistência à compressão é uma ótima propriedade usada para se definir a qualidade geral de um composto cimentício. Quanto maior a resistência à compressão, menos poroso e mais durável o composto cimentício provavelmente será.

Os testes de ciclagem fornecem uma visão do desempenho do material ao longo de ciclos repetidos de molhagem e secagem. Esse aspecto é particularmente relevante para argamassas empregadas na construção civil, sujeitas a ciclos constantes durante sua vida útil. Compreender o comportamento desses materiais nessas condições é de suma importância para garantir sua eficácia e durabilidade no contexto de aplicação (Azevedo *et al.*, 2017).

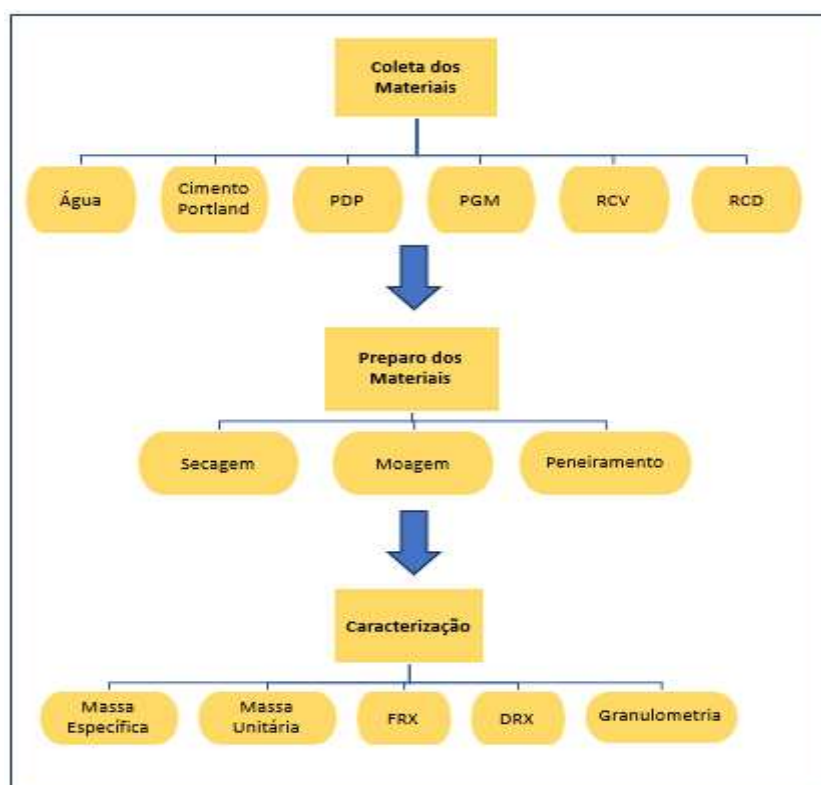
Por fim, conforme Bauer (2019), as variações de temperatura exercem uma influência significativa nos elementos estruturais dos compósitos cimentícios, especialmente em climas como o nosso, onde a amplitude térmica acentuada contribui para o surgimento de trincas térmicas. Essas trincas ocorrem devido à expansão e contração sob diferentes temperaturas, o que pode comprometer sua integridade estrutural ao longo do tempo.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados nesta pesquisa foram coletados na região de Caraúbas, no estado do Rio Grande do Norte, visando captar características específicas dos resíduos locais. Em seguida, os ensaios experimentais foram conduzidos no Laboratório de Materiais de Construção (LABMAT) da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), Campus Caraúbas-RN, onde todas as análises e testes foram realizados sob condições controladas para garantir a precisão dos resultados obtidos.

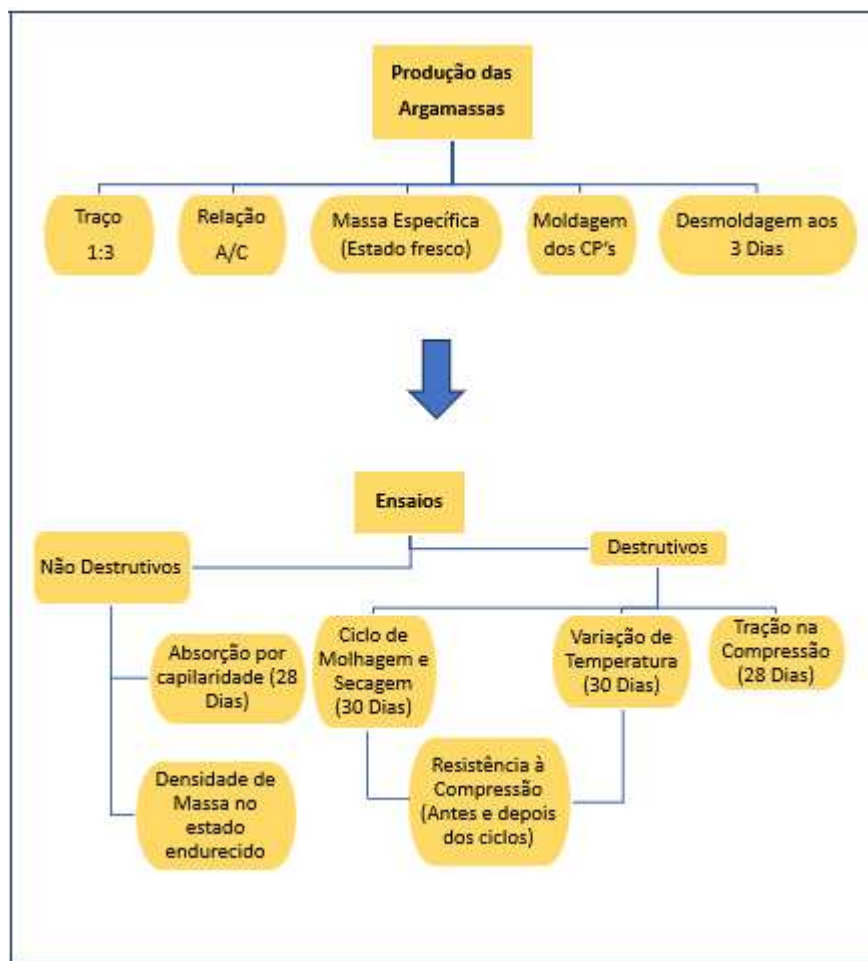
As Figuras 1 e 2 apresentam um resumo detalhado da metodologia adotada neste estudo, abrangendo todas as etapas, desde a coleta e preparo dos materiais até a execução dos ensaios laboratoriais com as argamassas. Esses fluxogramas visam fornecer uma visão clara e sequencial do processo experimental, permitindo uma compreensão abrangente das técnicas aplicadas.

Figura 1: Fluxograma das Etapas e Procedimentos Realizados nos Materiais



Fonte: Autoria própria (2024)

Observação: PDP – Pó de Pedra; PGM – Pó de Granito e Mármore; RCV – Resíduos de Cerâmica Vermelha; RCD – Resíduos da Construção e Demolição; FRX – Fluorescência de Raios X; DRX – Difração de Raios x.

Figura 2: Fluxograma das Etapas e Procedimentos Realizados nas Argamassas

Fonte: Autoria própria (2024)

4.1. MATERIAIS

Neste tópico, serão apresentados os materiais utilizados na confecção das argamassas, incluindo aglomerantes, água, agregados miúdos e materiais alternativos para a substituição parcial do cimento e dos agregados.

4.1.1. Cimento

O aglomerante utilizado na produção das argamassas deste estudo foi o cimento Portland CP V-ARI (Alta Resistência Inicial). A escolha desse tipo de cimento deve-se principalmente ao seu baixo teor de adições na composição, o que contribui para garantir uma melhor avaliação da influência dos resíduos utilizados nesta pesquisa para produção das argamassas. Além disso, o CP V-ARI apresenta alta resistência inicial, o que garante celeridade

na produção e realização dos ensaios das argamassas. A Figura 3 mostra o tipo do cimento utilizado.

Figura 3: Cimento Portland



Fonte: Autoria própria (2024)

4.1.2. PDP

O pó de pedra, derivado dos processos de britagem de rochas e pedras (também conhecido como pó de brita), foi coletado em uma pedreira próxima à cidade de Caraúbas. Esse material é um subproduto que consiste nos resíduos gerados durante a britagem, e geralmente não possui uma destinação específica em compósitos cimentícios. A Figura 4 a seguir mostra o material citado na forma em que ele é descartado na pedreira.

Figura 4: Pó de Pedra



Fonte: Autoria própria (2024)

O pó de pedra foi empregado como agregado miúdo de referência na produção das argamassas analisadas neste estudo, com o objetivo de desenvolver uma argamassa mais sustentável em comparação com a argamassa convencional feita com areia natural. Além disso, vários autores já comprovaram a viabilidade do uso do pó de pedra como substituto da areia natural (Silva, 2022; Félix, 2023; Lima 2022; Oliveira 2022; Vieira, 2022).

4.1.3. PGM

O PGM originado do corte e polimento das chapas de granito e mármore, foi obtido em uma marmoraria situada no município de Caraúbas/RN. Após a coleta, o pó foi seco em uma estufa e, em seguida, peneirado para obter uma característica fina, visando sua utilização parcial como substituto do cimento. Além disso, outra parte do resíduo foi utilizada para substituir o agregado, sendo esta empregada da forma como é descartada pela fábrica, devido ser descartado em forma de lama, sem muitas partículas graúdas, passando apenas pela estufa. A Figura 5 ilustra o aspecto do pó tanto no momento da coleta quanto após a secagem na estufa.

Figura 5:Pó de Granito e Mármore



Fonte: Autoria própria (2024)

4.1.4. RCV

Os resíduos de cerâmica vermelhas são originados dos restos de tijolos e telhas cerâmicas descartados em obras e lojas de materiais de construção. O material para o presente estudo foi coletado em uma loja localizada no município de Caraúbas/RN. Após a coleta, o material foi processado em um moinho para reduzir sua granulometria e, em seguida, passou por peneiras para obter uma granulometria adequada. Esse material foi então preparado para ser utilizado como substituto parcial do cimento e como substituto parcial do agregado. A Figura 6 ilustra o aspecto do material no momento da coleta e após o processamento no moinho e etapa de peneiramento.

Figura 6: Resíduos de Cerâmica Vermelha



Fonte: Autoria própria (2024)

4.1.5. RCD

Os resíduos de construção e demolição, originados de reformas, reparos e demolições, foram coletados em obras na cidade de Caraúbas/ RN. Estes resíduos eram constituídos principalmente por compostos cimentícios (argamassas e concreto) e cerâmicos (tijolos e telha), evitando a presença de gesso e tintas em sua mistura. Após a coleta, o material foi triturado pelo processo similar ao de RCV. Em seguida, foram passados por peneiras, ajustando a granulometria para que pudessem ser utilizados como substituto parcial do cimento e do agregado miúdo. A Figura 7 ilustra o aspecto dos resíduos no momento da coleta e após o processamento no moinho.

Figura 7: Resíduos da Construção e Demolição



Fonte: Autoria própria (2024)

4.1.6. Água

A água empregada na produção das argamassas foi proveniente da rede de abastecimento da UFERSA, no campus de Caraúbas/ RN. Ela também foi utilizada no processo de cura dos copos de provas, além dos ensaios de ciclos de molhagem e secagem e na absorção por capilaridade.

4.2. MÉTODOS

A presente pesquisa utilizou, em sua maioria, métodos de ensaio baseados em normas da ABNT e em estudos semelhantes, garantindo a conformidade e a precisão dos resultados. A maior parte dos ensaios foram realizados nos laboratórios de Engenharia Civil da UFERSA, no campus Caraúbas, que oferece uma infraestrutura adequada para os ensaios. No entanto, os ensaios de Fluorescência de Raios X (FRX) e Difração de Raios X (DRX), que requerem equipamentos específicos, foram conduzidos no laboratório TECNOMAT-UFPB, em João Pessoa-PB, devido à disponibilidade de recursos técnicos avançados nessa instituição. Esse procedimento diversificado permitiu uma análise mais abrangente e precisa dos resíduos estudados.

4.2.1. Caracterização dos Resíduos

4.2.1.1. Massa Específica e Massa Unitária

A determinação da massa específica para resíduos e aglomerantes foi realizada seguindo os procedimentos definidos pela NBR 16605 (ABNT, 2017). Conforme a norma mencionada, o teste considera a relação entre a massa do agregado e seu volume, sem considerar os poros permeáveis. Esta norma descreve os métodos para calcular a massa específica do cimento Portland e de outros materiais em pó, utilizando o frasco volumétrico de Le Chatelier, garantindo a exatidão dos resultados. A Figura 8 ilustra os materiais utilizados no ensaio.

Figura 8: Massa Específica



Fonte: Autoria própria (2024)

A massa unitária, foi determinada conforme especificado pela norma NBR 16972 (ABNT, 2021). Ela representa a relação entre a massa do material inserido em um recipiente e o volume total que esse material ocupa, incluindo não apenas a matéria sólida, mas também os espaços vazios presentes entre as partículas. A Figura 9 ilustra o processo realizado para a determinação da massa unitária.

Figura 9: Massa Unitária



Fonte: Autoria própria (2024)

4.2.1.2. Fluorescência de Raios – X

A técnica de Fluorescência de Raios X (FRX), é uma técnica analítica que se baseia na emissão de radiação fluorescente por um material quando este é excitado por raios X de alta energia. O método consiste na exposição da amostra a uma fonte de raios X, que promove a ionização dos átomos presentes, resultando na emissão de raios X característicos para cada elemento químico. Esses raios X emitidos são então detectados e analisados, permitindo a identificação qualitativa e quantitativa dos elementos na amostra, normalmente por meio de óxidos (Tavares *et al.*, 2022).

4.2.1.3. Difração de Raios - X

A difração de raios X (DRX) é uma técnica analítica poderosa utilizada para determinar a estrutura cristalina de materiais. Segundo Tavares *et al.* (2022) o método baseia-se na

interação de raios X com os átomos em uma amostra cristalina, onde os raios incidentes são difratados de acordo com os planos cristalinos presentes. A análise é conduzida direcionando um feixe de raios X sobre a amostra e registrando os padrões de difração resultantes. Esses padrões são então interpretados para fornecer informações detalhadas sobre a disposição atômica, permitindo a identificação de fases cristalinas, cálculo de parâmetros de rede e determinação da orientação de cristais.

4.2.1.4. Granulometria

A granulometria foi realizada conforme a norma NBR 7211 (ABNT, 2022). O método envolve o peneiramento, onde o material é passado por uma série de peneiras de malhas progressivamente menores, permitindo a separação das partículas em diferentes faixas de tamanho. O resultado é geralmente expresso como uma curva de distribuição granulométrica, que mostra a porcentagem de partículas de diferentes tamanhos. A Figura 10 ilustra o conjunto de peneiras utilizadas no ensaio.

Figura 10: Conjunto de Peneiras



Fonte: Autoria própria (2024)

4.2.2. Produção das Argamassas

Os corpos de provas para análise foram produzidos de três formas distintas com a finalidade de comparar o comportamento das argamassas. Foi produzido uma argamassa de referência composta por Cimento Portland tipo CP V, pó de pedra e água + aditivo. Nos demais corpos de provas será realizado a substituição parcial, em massa, do cimento e do agregado miúdo por resíduos sustentáveis regionais.

Neste estudo, foram produzidos sete tipos de argamassas, todas com a proporção (traço) de 1:3 em volume, visto que é o mais usado em obras comuns, porém foi convertido em 1:4,98 em massa, para melhor precisão em laboratório. Além disso, a quantidade de aditivo utilizado nos traços foi determinada de acordo com o fabricante, que especifica que deve ser utilizado em média 0,3% de aditivo em relação a massa do cimento.

Em resumo, o procedimento se deu com a produção de 7 tipos de traços, ao quais as devidas nomenclaturas são especificadas na Tabela 1. As argamassas mencionadas foram preparadas utilizando as dosagens especificadas para cada material, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 1: Nomenclatura das Argamassas e Suas Composições

Traço em Massa	Nomenclatura	Composições
1:4,98 (Aglomerante: Agregado)	CP-REF	100% Cimento + 100% Pó de Pedra + 100% Água + 0,3% Aditivo
	CP-PGM 10	90% Cimento + 10% Pó de Granito e Mármore + 100% Pó de Pedra + 100% Água + 0,3% Aditivo
	CP-RCV 10	90% Cimento + 10% Resíduos de Cerâmica Vermelha + 100% Pó de Pedra + 100% Água + 0,3% Aditivo
	CP-RCD 10	90% Cimento + 10% Resíduos da Construção e Demolição + 100% Pó de Pedra + 100% Água + 0,3% Aditivo
	AGR-PGM 25	100% Cimento + 75% Pó de Pedra + 25% Pó de Granito e Mármore + 100% Água + 0,3% Aditivo
	AGR-RCV 25	100% Cimento + 75% Pó de Pedra + 25% Resíduos de Cerâmica Vermelha + 100% Água + 0,3% Aditivo
	AGR-RCD 25	100% Cimento + 75% Pó de Pedra + 25% Resíduos da Construção e Demolição + 100% Água + 0,3% Aditivo

Fonte: Autoria Própria (2024)

Tabela 2: Consumo de Materiais

Traço	Cimento (Kg/m³)	Pó de Pedra (Kg/m³)	Água (Kg/m³)	A/C	Aditivo (mL/m³)	Resíduos (Kg/m³)
CP-REF	319,3	1590	306,5	0,96	0,64	0
CP-PGM 10	287,3	1590	321,8	1,12	0,57	31,9
CP-RCV 10	287,3	1590	316,1	1,1	0,57	31,9
CP-RCD 10	287,3	1590	319	1,11	0,57	31,9
AGR-PGM 25	319,3	1192,5	332	1,04	0,64	397,5
AGR-RCV 25	319,3	1192,5	332	1,04	0,64	397,5
AGR-RCD 25	319,3	1192,5	367,2	1,15	0,64	397,5

Fonte: Autoria Própria (2024)

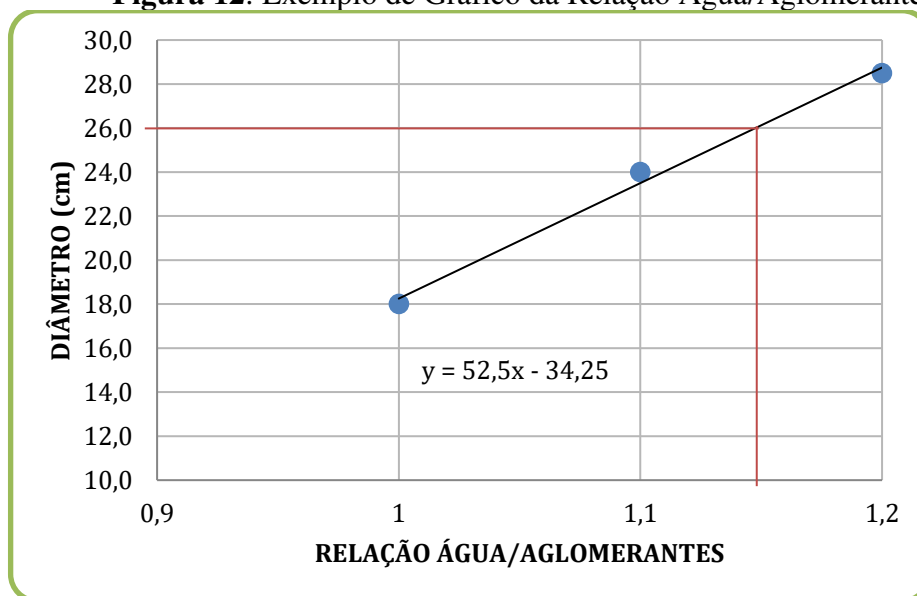
4.2.2.1. Relação Água Cimento

Para determinar a relação água/cimento (A/C), foi realizado o ensaio de consistência conforme a norma NBR 13276 (ABNT, 2016), que estabelece os procedimentos para avaliar a consistência de pastas de cimento. Esse ensaio é fundamental para garantir que a mistura contenha a quantidade adequada de água, o que é crucial para a trabalhabilidade do concreto e da argamassa, além de assegurar a hidratação correta do cimento. A Figura 11 apresenta os procedimentos utilizados no ensaio de consistência. Foram produzidas argamassas com três diferentes relações A/C para cada resíduo, a fim de plotar um gráfico que correlaciona a relação A/C com o diâmetro de espalhamento na mesa de consistência. O gráfico da Figura 12 ilustra como é feita a escolha da relação a/c.

Figura 11: Ensaio de Consistência



Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 12: Exemplo de Gráfico da Relação Água/Aglomerante

Fonte: Autoria própria (2024)

A análise da curva traçada no gráfico permitiu identificar a relação água/aglomerante ideal para cada tipo de resíduo estudado. Neste exemplo foi utilizado o traço de RCV substituindo a gregado. Considerando um diâmetro de abertura estabelecido pela norma NBR 13276 (ABNT, 2016), o valor correspondente foi projetado no gráfico ou substituindo o valor de y na equação da reta gerada no gráfico por 26 cm para determinar a quantidade de água com precisão. Esse procedimento possibilita uma formulação otimizada para cada mistura, ajustando as propriedades reológicas e a resistência da argamassa de acordo com a variação de resíduos empregados.

4.2.2.2. Massa Específica no Estado Fresco

O ensaio de massa específica de argamassas no estado fresco foi realizado conforme a norma NBR 13278 (ABNT, 2005). Esse ensaio tem como objetivo determinar a densidade ou massa específica da argamassa, que corresponde à relação entre sua massa e o volume enquanto ainda está em estado fresco. Para a execução, utilizou-se um recipiente de volume conhecido, preenchido com a argamassa fresca. A partir da pesagem da argamassa, foi possível calcular a massa específica.

4.2.2.3. Moldagem e Desmoldagem dos CP's

Os quatro tipos de argamassas foram moldados em moldes cilíndricos de PVC com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, em conformidade com a norma NBR 5738 (ABNT, 2015), que especifica que os moldes sejam cilíndricos e tenham altura igual ao dobro do diâmetro. Após o preparo, os moldes foram preenchidos com a argamassa, compactados e nivelados.

Os CP's foram desmoldados após um período de 3 dias de cura dentro dos moldes, seguidos por 8 dias de imersão em água para otimizar a hidratação da argamassa, e mais 17 dias em cura ao ar. A Figura 13 ilustra o procedimento comentado.

Figura 13: Moldagem e Desmoldagem dos CP's



Fonte: Autoria própria (2024)

4.2.3. Ensaios Não Destrutivos nas Argamassas

4.2.3.1. Absorção por Capilaridade

O ensaio foi realizado conforme os critérios estabelecidos pela norma NBR 15259 (ABNT, 2005). O método consistiu em avaliar o aumento de massa dos corpos de prova devido à absorção de água por capilaridade, em sete intervalos de tempo predeterminados. Os corpos de prova foram colocados em um recipiente com água, de modo que não tocassem o fundo, sendo imersos apenas 5 mm em relação à sua altura. Após cada intervalo de imersão, as massas dos corpos de prova foram medidas. Com base nesses dados, foram calculados os coeficientes de capilaridade de acordo com as orientações da norma. O teste foi realizado quando os corpos de prova atingiram 28 dias de idade. A Figura 14 ilustra alguns dos corpos de prova utilizados durante o ensaio.

Figura 14: Absorção por Capilaridade



Fonte: Autoria própria (2024)

4.2.3.2. Densidade de Massa no Estado Endurecido

O ensaio teve como propósito avaliar a massa específica aparente dos CP's, ou seja, a relação entre a massa do material e o volume ocupado. O teste foi conduzido de acordo com a norma NBR 13280 (ABNT, 2005). A análise foi realizada para cada traço de argamassa aos 28 dias de idade.

4.2.4. Ensaios Destrutivos nas Argamassas

4.2.4.1. Ciclos de Molhagem e Secagem

De forma geral, CP's utilizados nos ciclos de molhagem e secagem foram submetidos a um processo de envelhecimento acelerado, baseado em ciclos alternados. Essa metodologia envolve a imersão dos corpos de prova em água por um período preestabelecido, seguida por

uma etapa de secagem em temperaturas elevadas, geralmente superiores à temperatura ambiente (acima de 25°C, em média). O objetivo é simular condições semelhantes às do inverno, onde as argamassas passam por ciclos de umedecimento causados pela chuva e secagem provocada pela exposição ao calor solar.

Esse ensaio é amplamente utilizado em diversos estudos para avaliar argamassas contendo resíduos. Um exemplo é o trabalho de Marvila *et al.* (2020), que aplicou ciclos de molhagem e secagem de 24 horas. Durante esses ciclos, a argamassa foi saturada em água destilada à temperatura ambiente por 12 horas, seguida de secagem em estufa a 110 °C pelo mesmo período. Foram executados trinta ciclos similar a este trabalho. Outro trabalho que utilizou este ensaio foi o de Félix (2023) onde o autor estabeleceu ciclos de 24 horas, consistindo em 6 horas de imersão das amostras em água, seguidas por 18 horas de secagem em estufa a 95°C ± 5°C. Onde o mesmo realizou 10 ciclos no total.

A metodologia utilizada para esse processo foi baseada em estudos anteriores, como o de Farias Filho, Toledo Filho e Lima (2010), que conduziram ensaios similares, onde cada ciclo possuía uma duração total de 24 horas, sendo composto por 15 horas de secagem em estufa a 65 °C ± 5 °C, seguido de 30 minutos de secagem ao ar. Em seguida, havia uma imersão de 8 horas em água, finalizando com mais 30 minutos de secagem ao ar.

O envelhecimento acelerado foi realizado submetendo as amostras a ciclos de molhagem e secagem. Cada ciclo tinha uma duração total de 24 horas, sendo composto por 18 horas de secagem em estufa a 100 °C ± 5 °C, seguidas por 6 horas de imersão em água a fim de simular as condições de inverno que as argamassas estão propícias na região nordeste. Também foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão conforme a NBR 13279 (ABNT, 2005). A Figura 15 mostra um resumo do ciclo de molhagem e secagem.

Figura 15: Processo de Molhagem e Secagem



Fonte: Autoria própria (2024)

4.2.4.2. Ciclos de Variação de Temperatura

De forma análoga aos ciclos de molhagem e secagem, os CP's produzidos neste estudo foram submetidos a ciclos de Variação de Temperatura com a finalidade de ocasionar o envelhecimento rápido da argamassa com ciclos de tempos predeterminado. Os tempos de aquecimento e resfriamento foram escolhidos com base nas condições típicas da região interior do Rio Grande do Norte e do nordeste brasileiro, que enfrentam longos períodos de estiagem e altas temperaturas durante o ano todo.

Trabalhos como o de Sentena (2015), serviram como embasamento para a metodologia adotada neste trabalho. o autor previu um ciclo de 300 minutos, composto por 60 minutos de aquecimento em câmara climática, 60 minutos de estabilização e 180 minutos de resfriamento. A temperatura foi fixada em cerca de 75 °C, e o autor realizou 40 ciclos consecutivos nos revestimentos. Outro trabalho similar foi o das autoras Paes e Carasek (2002), que realizaram 20 ciclos de aquecimento e resfriamento em placas cerâmicas, variando a temperatura entre 23-33°C (temperatura ambiente) e 60-70°C (temperatura máxima). Após cada ciclo, elas mediram as movimentações das placas. Ao final dos ciclos, foram feitas observações visuais, testes de percussão nos revestimentos e verificações da resistência à tração das placas cerâmicas, além de uma análise completa dos materiais do sistema de revestimento.

A metodologia adotada neste trabalho consistiu em submeter os corpos de prova a ciclos de variação de temperatura durante um período definido. O procedimento inclui 6 horas de exposição em estufa a $100^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, seguidas de 18 horas de resfriamento até atingir a temperatura ambiente (em média, 25°C). Os CP's foram fotografados antes e depois do ensaio a fim de analisar como os CP's se comportaram visualmente durante o período de 30 dias de ensaio. Além disso, foram submetidos a ensaios de resistência a compressão antes dos ciclos e após os ciclos a fim de analisar como as argamassas se comportam após os ciclos de variação de temperatura. A Figura 16 ilustra o procedimento seguido para o referente ensaio.

Figura 16: Processo de Variação de Temperatura



Fonte: Autoria própria (2024)

4.2.4.3. Ensaio de Tração por Compressão Diametral

Este ensaio foi realizado nos CP's aos 28 dias de idade e o método para a determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos foi seguido conforme a NBR 7222 (ABNT, 2011), onde o corpo de prova é colocado horizontalmente entre as placas de uma prensa de compressão, de modo que o carregamento seja aplicado ao longo de duas geratrizes opostas do cilindro. O carregamento deve ser contínuo e uniforme, com uma taxa de aplicação controlada, que neste estudo foi utilizada um carregamento com cerca de 0,5 N/s.

Durante o teste, a força máxima aplicada no momento em que o corpo de prova se rompe é registrada. A resistência à tração por compressão diametral é então calculada por meio da equação que é fornecida pela norma citada anteriormente:

$$F_{ct,sp} = \frac{2*F}{\pi*d*L} \quad (1)$$

Onde, $F_{ct,sp}$ é resistência à tração por compressão diametral que é expressa em Mega Pascal (MPa); F é a carga aplicada pela máquina expressa em Newton (N); d é o diâmetro e L o comprimento do dos CP's que ambos são expressos em milímetros (mm). A Figura 17 ilustra os materiais e o processo de rompimento dos CP's.

Figura 17: Tração Por Compressão Diametral



Fonte: Autoria própria (2024)

4.2.4.4. Ensaio de Resistência a Compressão

O ensaio de resistência à compressão foi conduzido de acordo com a NBR 13279 (ABNT, 2005). Foram utilizados corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 50 mm e 100 mm de comprimento, testados aos 28 dias de cura. Após a realização dos ciclos de molhagem, secagem e variação de temperatura, os corpos de prova também foram rompidos, com o objetivo de comparar os resultados após esses tratamentos e analisar o comportamento dos resíduos submetidos às condições adversas.

O ensaio de resistência à compressão é um dos métodos mais comuns para avaliar a capacidade de um material suportar forças que o comprimem, ou seja, medir sua resistência à compressão axial. De modo geral, os passos para realizar o ensaio, de acordo com a norma NBR 7215 (ABNT, 2019) Cimento Portland - determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos, são:

- Preparação dos corpos de provas, onde ocorre a moldagem, desmoldagem e retificação dos CP's. As dimensões e a superfície do corpo de prova devem estar dentro de especificações normativas para garantir precisão no teste.
- Posicionamento na máquina de ensaio, onde o corpo de prova é colocado entre as placas de compressão de uma máquina de ensaio universal. As superfícies que receberão a carga devem ser planas e paralelas para garantir uma distribuição uniforme da força.
- Aplicação da carga, em que a carga é aplicada de forma gradual e contínua no eixo longitudinal do corpo de prova, ou seja, no sentido axial.
- E por fim, registro da carga máxima que é exercida no corpo de prova, onde é registrada pela máquina a força máxima até o momento da ruptura.

Com base nessa carga e nas dimensões do corpo de prova, calcula-se a resistência à compressão com base na Equação 2.

$$f_c = \frac{F}{A} \quad (2)$$

Onde f_c geralmente é expressa em unidades de força por área (como megapascals, MPa). F em Newton (N) e A em metro quadrado (m²). A Figura 18 mostra o equipamento utilizado para esse ensaio.

Figura 18: Resistência a Compressão



Fonte: Autoria própria (2024)

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

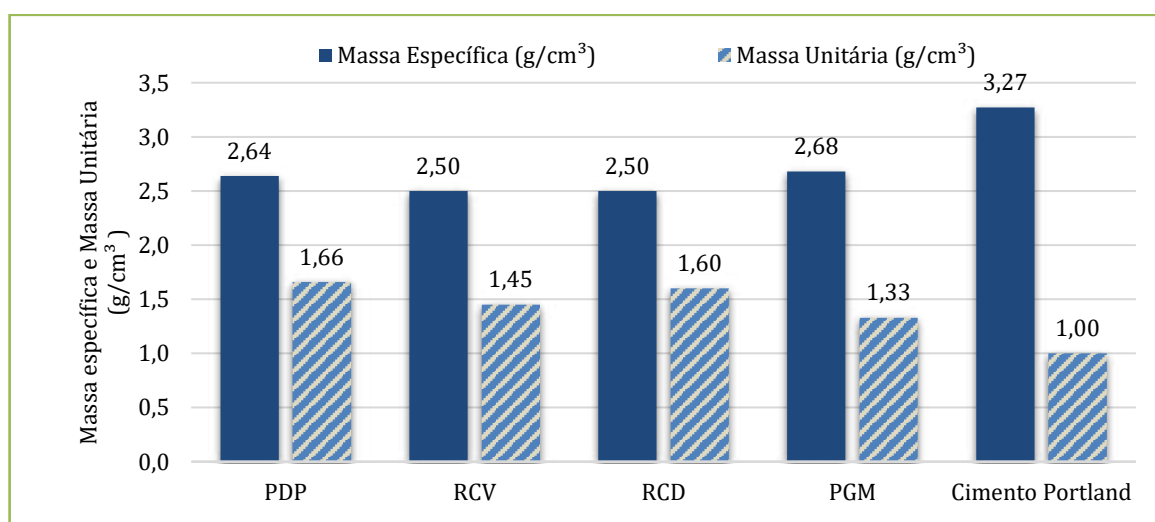
Neste item, estão apresentados e discutidos os resultados dos ensaios de caracterização dos materiais, assim como as análises sobre a influência dos resíduos de pó de pedra, pó de mármore, resíduos de cerâmicas vermelhas e resíduos da construção e demolição nas propriedades das argamassas, tanto no estado fresco quanto no endurecido. Além disso, serão abordados os tipos de ataques a que essas argamassas foram submetidas.

5.1. CARACTERIZAÇÃO

5.1.1. Massa Específica e Massa Unitária

A Figura 19 apresenta os resultados obtidos para a massa específica e a massa unitária dos resíduos utilizados, tanto na substituição parcial do aglomerante quanto do agregado, conforme as normas NBR 16605 (ABNT, 2017) e NBR 16972 (ABNT, 2021), que regulamentam, respectivamente, os ensaios de massa específica e massa unitária.

Figura 19: Massa Específica e Massa Unitária dos Resíduos



Fonte: Autoria própria (2024)

5.1.1.1. Pó de Pedra

Os valores de massa específica e massa unitária do pó de pedra observados neste estudo foram em parte semelhantes aos encontrados por Macedo (2021), que relatou uma massa

específica de 2,64 g/cm³. No entanto, houve uma pequena diferença nos valores de massa unitária, com Macedo registrando 1,47 g/cm³. Imagina-se que o PDP analisado tenha uma composição granulométrica com as partículas uniformemente bem distribuída, conforme será visto na Figura 24 do item 5.1.4.1, que pode ter influenciado o alto valor de massa unitária.

A partir da Figura 19, nota-se que o pó de pedra apresentou uma massa específica ligeiramente inferior à do pó de mármore, embora sua massa unitária tenha sido superior. Essa diferença pode ser explicada pelo formato físico das partículas do pó de pedra, que parecem formar um arranjo granulométrico mais compacto, resultando em um menor volume de espaços vazios entre os agregados, porém, precisaria da granulometria a laser para avaliar o tamanho das partículas.

5.1.1.2. Resíduos de Cerâmica Vermelha

Os valores de massa específica e massa unitária do RCV apresentados neste estudo foram, em parte, compatíveis com os resultados de Mendes e Borja (2008). Eles informam uma massa específica de 2,63 g/cm³, valor semelhante ao encontrado por Macedo (2021) para PDP. Contudo, observou-se uma leve discrepância nos valores de massa unitária: enquanto Mendes e Borja registraram 1,21 g/cm³ para o RCV, o presente estudo apontou um valor de 1,45 g/cm³.

A diferença na massa unitária de materiais semelhantes oriundos de regiões distintas pode ser explicada por diversos fatores, sendo um dos principais as variações nas condições ambientais e geológicas de cada local. Solos ou rochas de uma região podem apresentar variações significativas em termos de compactação, granulometria, porosidade e teor de umidade, elementos que influenciam diretamente a densidade aparente do material.

5.1.1.3. Resíduos da Construção e Demolição

O RCD apresentou uma massa específica semelhante à do RCV investigado neste estudo, ambos atingindo o valor de 2,50 g/cm³. Contudo, observou-se uma pequena variação na massa unitária. O estudo de Menezes (2009) revelou resultados semelhantes em relação à massa específica, identificando 2,43, 2,52 e 2,69 g/cm³ para três tipos de amostras, sendo um desses valores bastante parecidos com o encontrado neste estudo.

A composição dos resíduos pode afetar essas variações, pois podem ser compostas por diversos materiais de construção, tais como concreto, cerâmica, vidro ou metais, cada um contribuindo com densidades específicas.

O estudo de Vieira (2022), que coletou amostras na mesma cidade deste estudo, porém em projetos diferentes, também revelou variações na composição do RCD. A autora alcançou uma concentração de 2,61 g/cm³, um valor que não difere muito deste estudo. Isso reforça a noção de que a procedência e o tipo de construção impactam diretamente na geração de resíduos, justificando as variações notadas. Por exemplo, em processos de demolição, pode ocorrer um acúmulo maior de tijolos e concreto, enquanto em construções recentes, os detritos podem incluir mais materiais delicados e embalagens. Assim, a diversidade de tipos de materiais descartados na construção civil e suas diferentes composições têm um papel fundamental na definição das características físicas dos materiais, tais como a massa específica e a densidade.

5.1.1.4. Pó de Granito e Mármore

Entre os resíduos estudado neste trabalho, o PGM foi o que mais se aproximou do pó de pedra, resíduo que será utilizado como agregado na produção da argamassa de referência, porém, em relação a massa unitária, o pó de mármore tem um valor inferior em relação ao PDP. Estudos como o de Silva (2022) obtiveram resultados próximos para a massa específica do PGM, encontrando um valor real de 2,78 g/cm³.

5.1.1.5. Cimento Portland

Diante do ensaio de massa específica e massa unitária realizado no CP V ARI, observou-se que os resultados colhidos estão dentro dos parâmetros estabelecido pela Polimix (2018) da MIZU, indústria de cimento Portland, que especifica a massa específica entre 2,8 e 3,2 g/cm³ e massa unitária entre 0,88 e 0,93 g/cm³, resultados que se aproximaram bastante do material analisado neste estudo.

5.1.2. Fluorescência de Raios X

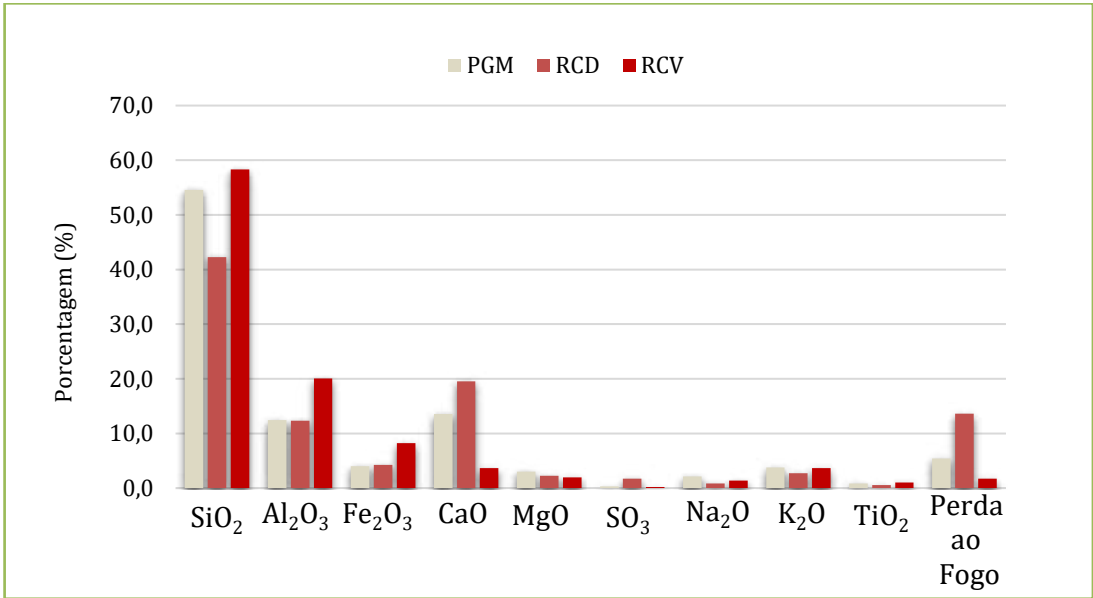
Os resultados que correspondem à composição química dos resíduos utilizados estão presentes na Tabela 3 e para melhor análise de dados, a Figura 20 ilustra a composição química dos resíduos estudados.

Tabela 3: Composição Química dos Resíduos

ÓXIDO	TEOR (%)		
	PGM	RCD	RCV
SiO ₂	54,59	42,28	58,30
Al ₂ O ₃	12,43	12,32	20,07
Fe ₂ O ₃	4,01	4,24	8,21
CaO	13,53	19,53	3,62
MgO	3,02	2,22	1,94
SO ₃	0,29	1,73	0,18
Na ₂ O	2,10	0,82	1,35
K ₂ O	3,77	2,69	3,64
TiO ₂	0,86	0,56	1,00
Perda ao Fogo	5,41	13,62	1,70

Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 20: Composição Química dos Resíduos



Fonte: Autoria própria (2024)

Depois de executar o teste de FRX, observou-se que os resíduos examinados contêm, em suas composições químicas, altas concentrações de óxidos SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ e CaO. Dos três tipos de resíduos analisados, o RCV se sobressai por conter a maior proporção de sílica (SiO₂), com 58,30%. Em seguida, vem o PGM, com 54,59%, e o RCD, com 42,28%. Adicionalmente, o RCV apresenta como mais elevadas concentrações de alumina (Al₂O₃) e de óxido de ferro (III) (Fe₂O₃). O RCV vem da argila logo é comum ter altos índices de alumina e

ferro. O PGM vem do granito e mármore, logo é comum ter CaO e Sílica. O RCD é o único resíduo com compostos hidratados (argamassas e concretos), logo é comum ter dado perda ao fogo maior, além de CaO. Por outro lado, o PGM destaca pelos altos níveis de SiO_2 , Al_2O_3 e CaO, além de uma perda ao fogo significativa. A presença de outros óxidos, como o óxido de magnésio (MgO), trióxido de enxofre (SO_3), dos álcalis óxido de sódio (Na_2O) e óxido de potássio (K_2O), e dióxido de titânio (TiO_2), embora em quantidades mínimas, são frequentemente visíveis como impurezas na composição dos resíduos, além de contribuírem com reações que geram manifestações patológicas em compósitos cimentícios (Mehta; Monteiro, 2008).

O SiO_2 é o óxido predominante, comprovando a existência de silicatos, tais como argilominerais, micas e feldspatos, bem como sílica livre, comumente encontrada na forma de quartzo. Esta combinação geralmente diminui a plasticidade do material. Outro óxido de grande importância é o Al_2O_3 , geralmente ligado à criação de argilomineral. O Fe_2O_3 , quando em grandes quantidades, dá à massa um tom escuro após a queima. A quantidade de MgO está ligada à existência de dolomita na composição (Campos *et al.*, 2021).

De acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2014), são necessários alguns requisitos para que resíduos sejam considerados Pozolânicos. A Tabela 4 ilustra os requisitos químicos exigidos pela norma.

Tabela 4: Requisitos Químicos para Resíduos Pozolânicos Conforme ABNT NBR 12653

Valores em porcentagem (%)

Propriedades	Classe de material pozolânico			Métodos de ensaio (*)
	N	C	E	
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	70	≥ 70	≥ 50	ABNT NBR NM 22
SO ₃	4	≤ 5	≤ 5	ABNT NBR NM 16
Teor de umidade	3	≤ 3	≤ 3	ABNT NBR NM 24
Perda ao fogo	10	≤ 6	≤ 6	ABNT NBR NM 18
Álcalis disponíveis em Na2O	1,5	≤ 1,5	≤ 1,5	ABNT NBR NM 25

(*) Os métodos de ensaios devem ser adaptados, substituindo-se o cimento Portland pelo material pozolânico.

N = Pozolanas naturais e artificiais.

C = Cinzas volantes.

E = Quaisquer pozolanas que não se encaixem nas classes N e C.

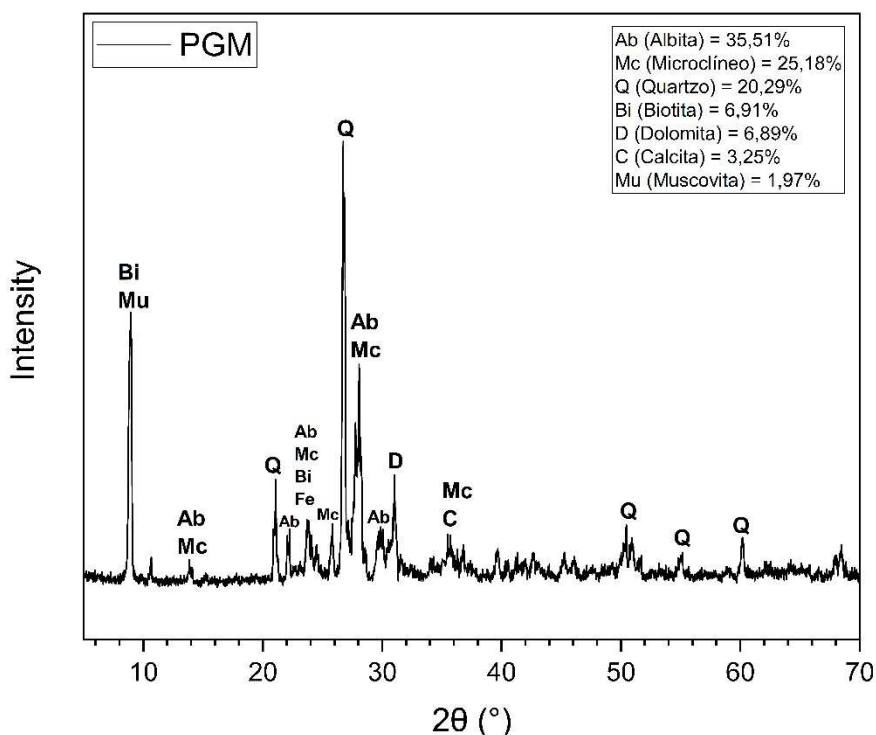
Fonte: Adaptado da NBR 12653 (ABNT, 2014)

De acordo com a tabela de requisitos químicos definidos pela norma, todos os materiais examinados cumprem o designado de soma dos óxidos, exibindo valores acima de 50% para materiais pozolânicos da categoria E. Além disso, atendem aos requisitos de SO_3 definidos para essa classe. Contudo, em relação à perda devido ao fogo, apenas o PGM e o RCV atendem às demandas. Portanto, de acordo com a composição sua química, o PGM e o RCV podem ser categorizados como materiais pozolânicos.

5.1.3. Difração de Raios – X

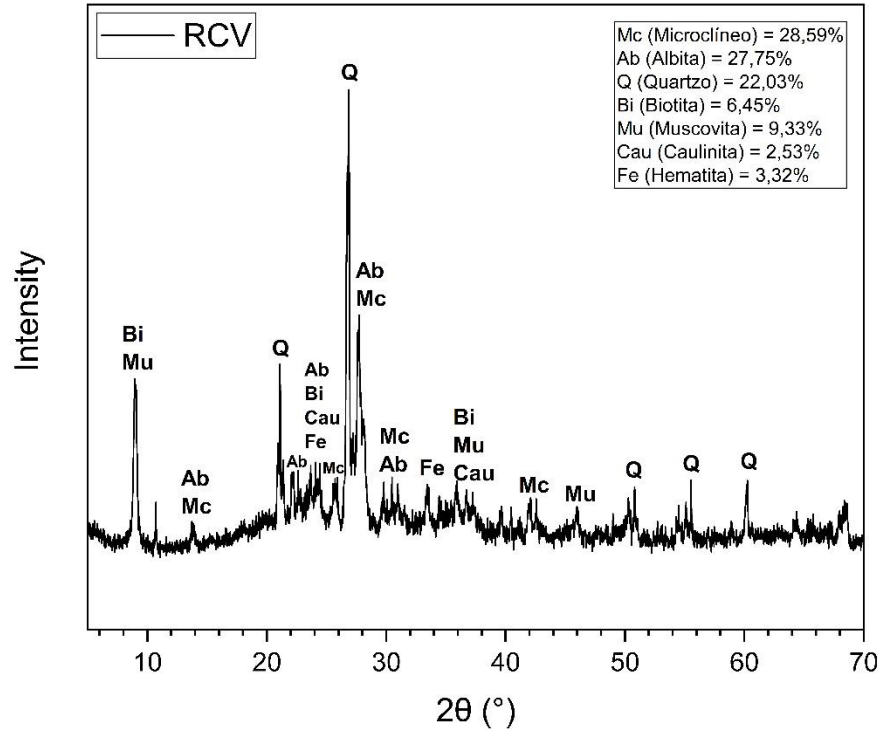
As Figuras 21, 22 e 23 ilustram os resultados obtidos pelo ensaio de difração de raios – x (DRX), respectivamente, onde no eixo X ilustra a angulação das fases e no eixo Y a intensidade das fases cristalinas dos resíduos.

Figura 21: DRX do Pó de Granito e Mármore



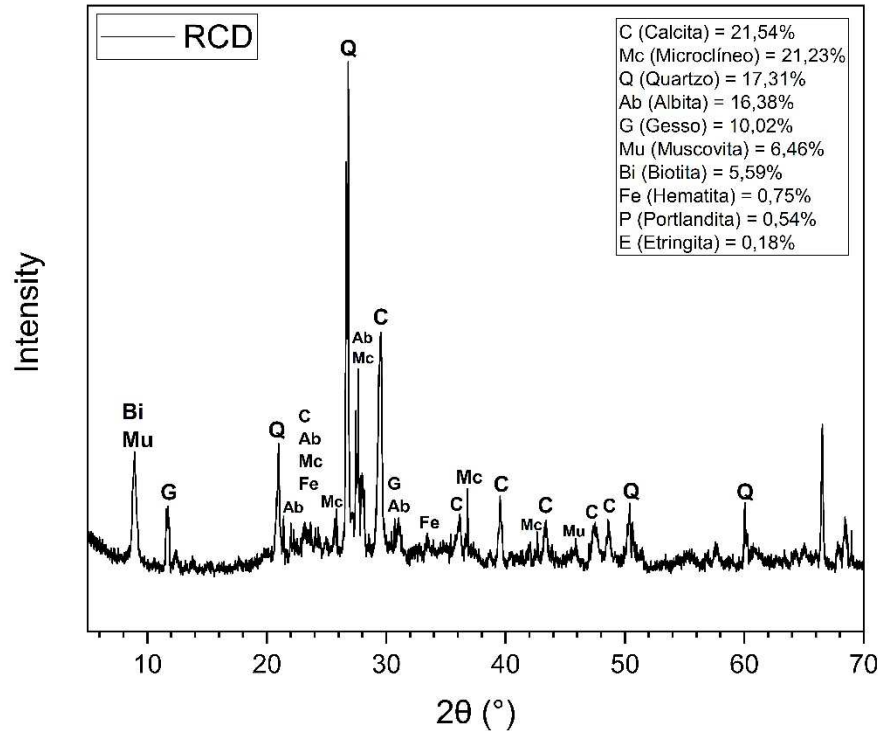
Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 22: DRX do Resíduo da Cerâmica Vermelha



Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 23: DRX do Resíduo da Construção e Demolição



Fonte: Autoria própria (2024)

O PGM, composto por rochas graníticas e calcárias, como evidenciado pela análise de FRX, já indicava uma composição mineralógica esperada, com altas concentrações de quartzo, albita e microclínio, originadas das rochas graníticas (feldspato, quartzo e mica), caracterizada por seu elevado teor de silício. Além disso, a presença de biotita e muscovita, micas originadas da argila, e de calcita e dolomita, derivadas do mármore, contribui com elementos como potássio, sódio, cálcio e magnésio respectivamente. Todos os esses compostos estão presentes no FRX dos resíduos.

Em análise similar, o RCV que é provido da argila mostrou-se com grandes taxas de quartzo, microclínio e albita que também já era esperado, pois dentre os resíduos, o RCV teve uma maior taxa de sílica como mostra o FRX. A presença de biotita, muscovita e hematita provém de minerais que em geral são encontrados principalmente na composição das argilas, como os silicatos de alumínio, magnésio, ferro, cálcio, potássio como mostrado no FRX.

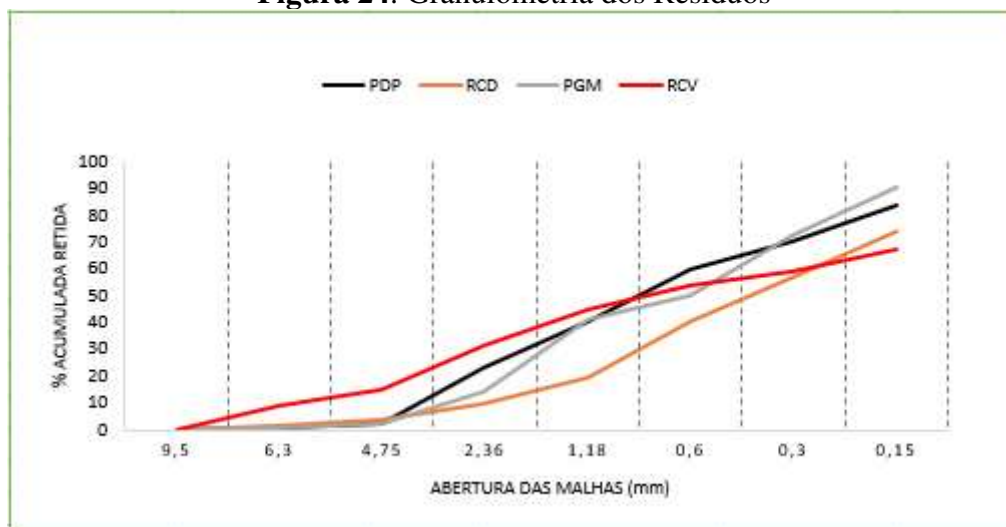
O RCD se destaca entre os resíduos pela sua rica composição mineralógica, resultante da diversidade de materiais que o compõem. Uma análise por DRX mostrou a presença significativa de calcita, microclínio e quartzo, derivado principalmente da sílica. Além disso, foram identificados outros minerais, como albita, biotita, muscovita e hematita, provavelmente relacionados à cerâmica vermelha. Partículas de gesso, encontradas em quantidade notável, indicam sua origem no cimento, em acabamentos ou restos de argamassas. A portlandita e etringita, fases hidratadas presentes em menor quantidade, é provavelmente proveniente do cimento usado nas argamassas.

De forma geral, a análise dos resíduos utilizando DRX e FRX permitiu identificar com precisão a composição mineralógica de cada material. Resíduos como PGM, RCV e RCD apresentam compostos comuns, como quartzo, microclínio, albita, muscovita e biotita, derivados de silício, cálcio e magnésio, sódio e potássio. O PGM, composto por rochas graníticas e calcárias, contém altas concentrações de silício, enquanto o RCV, oriundo de argilas, destaca-se pela presença de sílica e silicatos. Já o RCD mostra uma composição heterogênea, com fases minerais e hidratadas, evidenciando resíduos de materiais de construção, o qual podem variar em função da forma de obtenção e do local do resíduo.

5.1.4. Granulometria

Foi realizado o ensaio de granulometria em todos os resíduos, com o objetivo de obter a classificação das curvas granulométricas. A Figura 24 apresenta a granulometria de cada resíduo, permitindo a comparação com a curva de referência (PDP).

Figura 24: Granulometria dos Resíduos

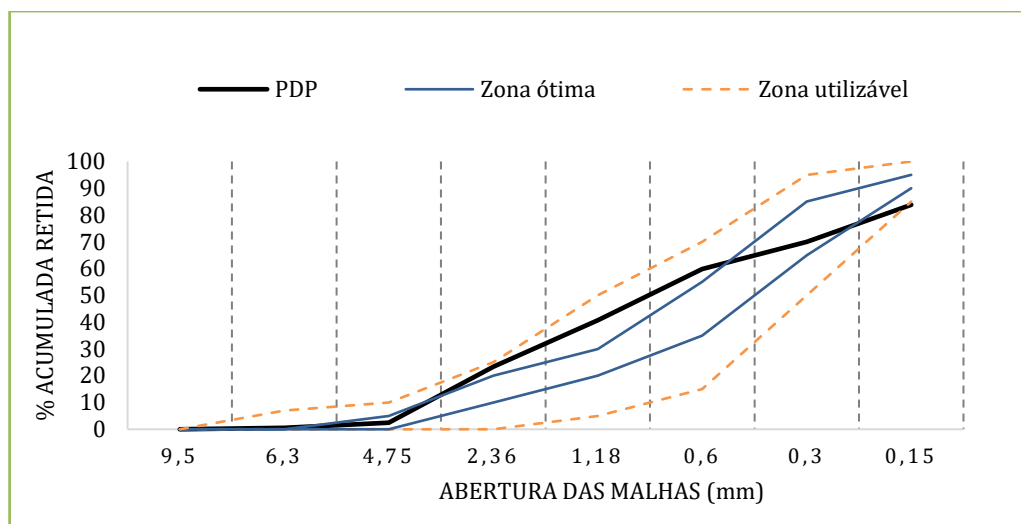


Fonte: Autoria própria (2024)

Ao analisar as granulometrias dos resíduos, observa-se que o PGM foi o que mais se mudou da curva do agregado de referência, PDP. As curvas de RCV e RCD, por sua vez, apresentaram maior variabilidade em relação ao PDP. Com isso, pressupõe-se que o PGM possua características físicas e mecânicas superiores em comparação aos demais resíduos.

5.1.4.1. Pó de Pedra

A Figura 25 apresenta a curva granulométrica, evidenciando as zonas ótimas e utilizável, além de permitir a identificação precisa da faixa em que o material se situa. Com base nesse ensaio, é possível classificar o material quanto ao seu módulo de finura (MF), auxiliando na determinação de sua adequação para diferentes aplicações. Essa análise detalhada contribui significativamente para a avaliação da qualidade do material, proporcionando uma visão clara das suas características granulométricas e dos seus potenciais limites.

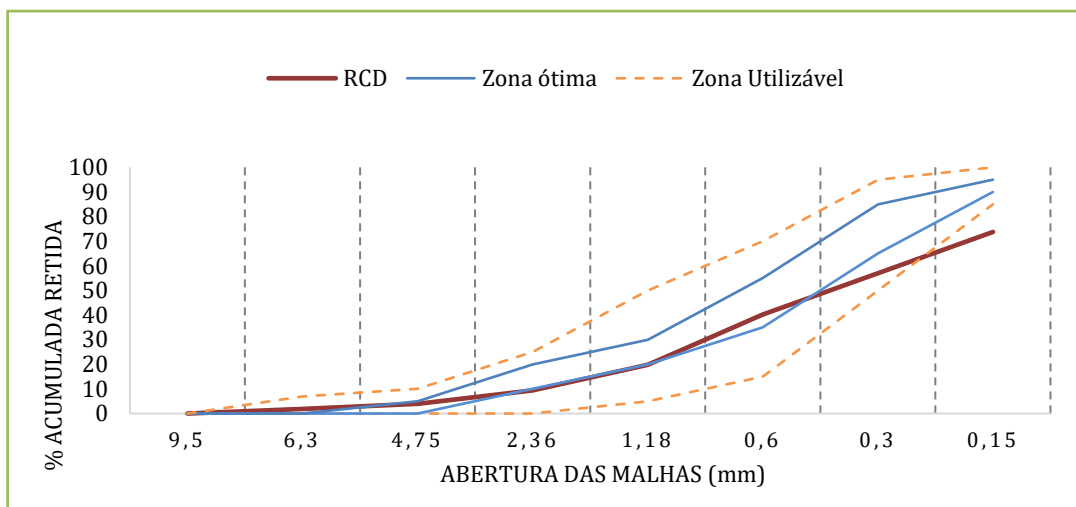
Figura 25: Granulometria do Pó de Pedra

Fonte: Autoria própria (2024)

Ao analisar a granulometria do PDP, observa-se que a distribuição das partículas está situada totalmente dentro da zona utilizável e apenas o material retido na peneira de 0,3 mm situa-se na zona ótima devido a elevada quantidade de material fino presente. O PDP apresentou um diâmetro máximo característico de 4,75 mm, e obtém um valor de 2,8 para MF. A curva granulométrica obtida revela uma predominância de partículas finas, o que pode influenciar diretamente a trabalhabilidade e a compactação do material, bem como seu comportamento em misturas cimentícias. Estudos como o de Silva (2022) e Oliveira (2022) obtiveram resultados similares para o MF do resíduo.

5.1.4.2. Resíduos da Construção e Demolição

A Figura 26 apresenta a curva granulométrica do RCD, evidenciando suas principais características granulométricas. Além disso, são exibidos os mesmos parâmetros que foram citados para o PDP, permitindo uma comparação clara entre ambos os materiais.

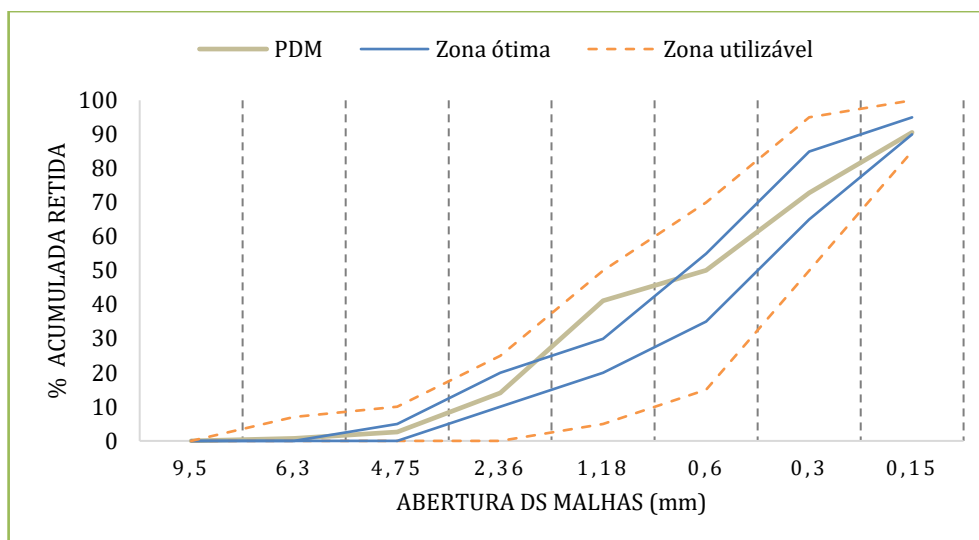
Figura 26: Granulometria do Resíduo da Construção e Demolição

Fonte: Autoria própria (2024)

A curva granulométrica do RCD se apresenta de forma mais suave, mantendo-se predominantemente dentro dos limites da zona ótima e utilizável para a aplicação. Isso indica uma distribuição granulométrica adequada, refletindo em características positivas para o material. O elevado valor de massa unitária do RCD reforça a uniformidade da distribuição dos seus grãos. O MF registrado foi de 2,04, o que representa um valor relativamente baixo em comparação com outros materiais analisados, sugerindo uma maior proporção de partículas finas. O diâmetro máximo característico das partículas foi de 4,75 mm. No estudo conduzido por Bins *et al.* (2022), os autores obtiveram resultados semelhantes em relação ao diâmetro máximo das partículas, com exceção do MF, onde o valor observado foi de 2,84.

5.1.4.3. Pó de Granito e Mármore

A Figura 27 ilustra a curva granulométrica do PGM, destacando de forma precisa suas principais características granulométricas. Além disso, são apresentados os mesmos parâmetros utilizados para o PDP e RCD, proporcionando uma análise comparativa detalhada entre os três materiais. Essa comparação permite identificar variações importantes nas distribuições granulométricas, possibilitando uma melhor compreensão das propriedades físicas de cada material e seu potencial adequação para diferentes aplicações técnicas.

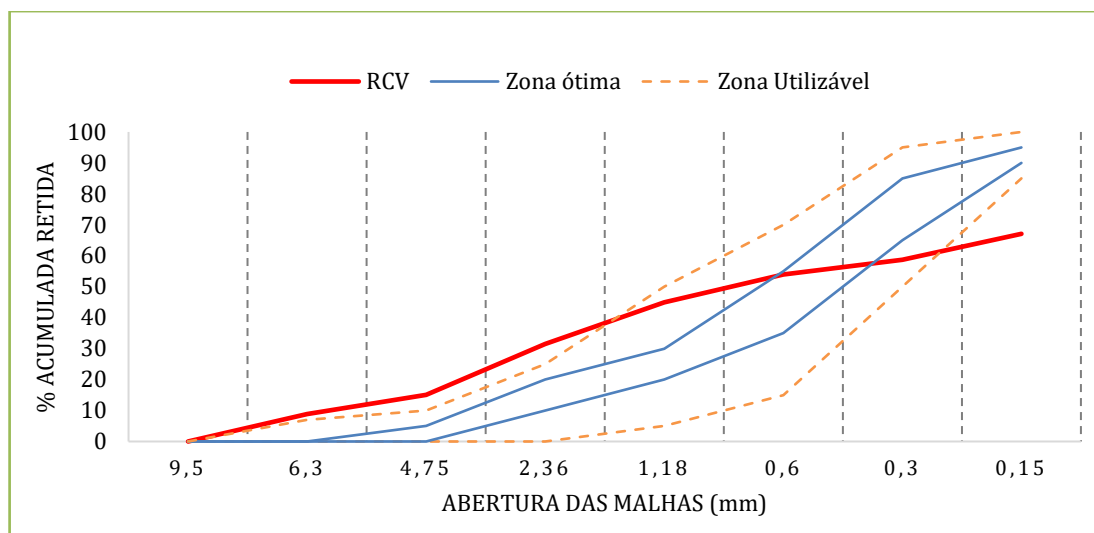
Figura 27: Granulometria do Pó de Granito e Mármore

Fonte: Autoria própria (2024)

A curva granulométrica do PGM apresenta-se de maneira bastante satisfatória, posicionando-se predominantemente dentro dos limites da zona ótima. Esse comportamento indica uma distribuição granulométrica bem equilibrada, o que resulta em características mecânicas e de desempenho favoráveis ao material. A alta massa específica observada sugere uma presença significativa de partículas finas, o que pode contribuir para uma maior densidade e compactação. O MF registrado foi de 2,71, enquanto o diâmetro máximo característico das partículas foi de 4,75 mm. Costa (2022) obteve resultados similares ao desta pesquisa.

5.1.4.4. Resíduos de Cerâmica Vermelha

A Figura 28 ilustra a curva granulométrica do RCV, destacando de forma precisa suas principais características granulométricas. Além disso, são apresentados os mesmos parâmetros utilizados para os demais resíduos, proporcionando uma análise comparativa detalhada dentre os materiais.

Figura 28: Granulometria do Resíduo de Cerâmica Vermelha

Fonte: Autoria própria (2024)

A curva analisada revela resultados pouco satisfatórios no que diz respeito à granulometria. De acordo com Oliveira (2019), um dos fatores que possivelmente influenciaram esse parâmetro foi o tempo de moagem. Quanto maior o tempo de moagem, mais fina será a granulometria e, conseqüentemente, menor o MF. Apesar disso, a autora obteve valores próximos para o MF e o diâmetro máximo característico. Nesta pesquisa, o MF e o diâmetro máximo do resíduo estudado foram de 2,71 e 4,75, respectivamente, valores que, embora distintos, seguem a tendência esperada conforme o comportamento descrito por Oliveira.

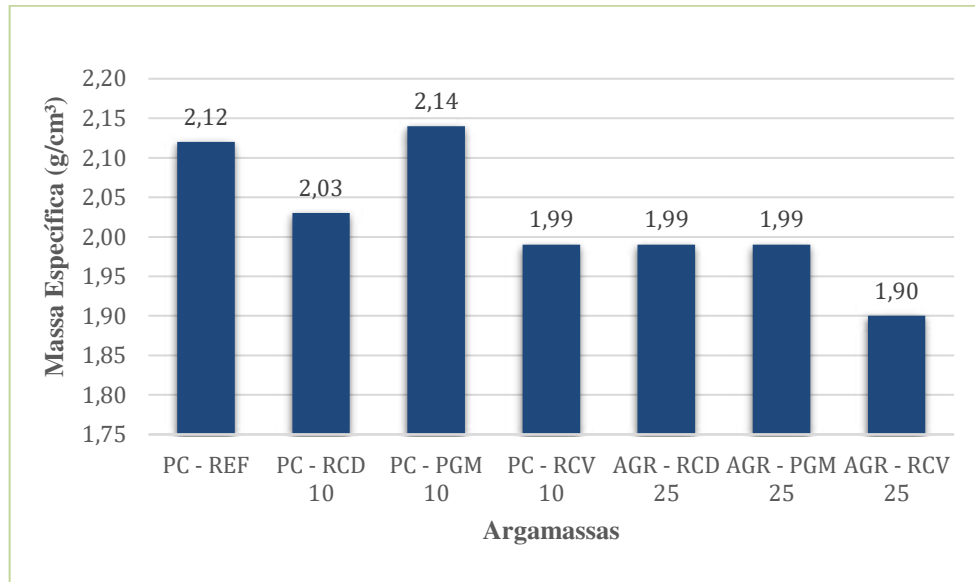
5.2. PRODUÇÃO DAS ARGAMASSAS

5.2.1. Massa Específica das Argamassas no Estado Fresco

A redução da densidade das argamassas com substituições parciais do cimento está diretamente ligada à diferença de massa específica entre o cimento e os resíduos utilizados, além da proporção em que esses materiais são trocados. O mesmo princípio se aplica à substituição dos agregados, onde a massa específica dos resíduos é comparada ao PDP, agregado de referência. Nota-se que as argamassas REF e PGM apresentam valores de massa específicos bastante similares, o que pode ser explicado pela semelhança entre as massas específicas dos grãos, conforme descrito no item 1.8.1. Já a discrepância observada entre os valores do AGR – RCV 25 e do CP– REF provavelmente indica a diferença na massa específica

dos agregados utilizados. Os resultados obtidos para a densidade massa das argamassas no estado fresco são apresentadas no gráfico da Figura 29.

Figura 29: Massa Específica das Argamassas no Estado Fresco

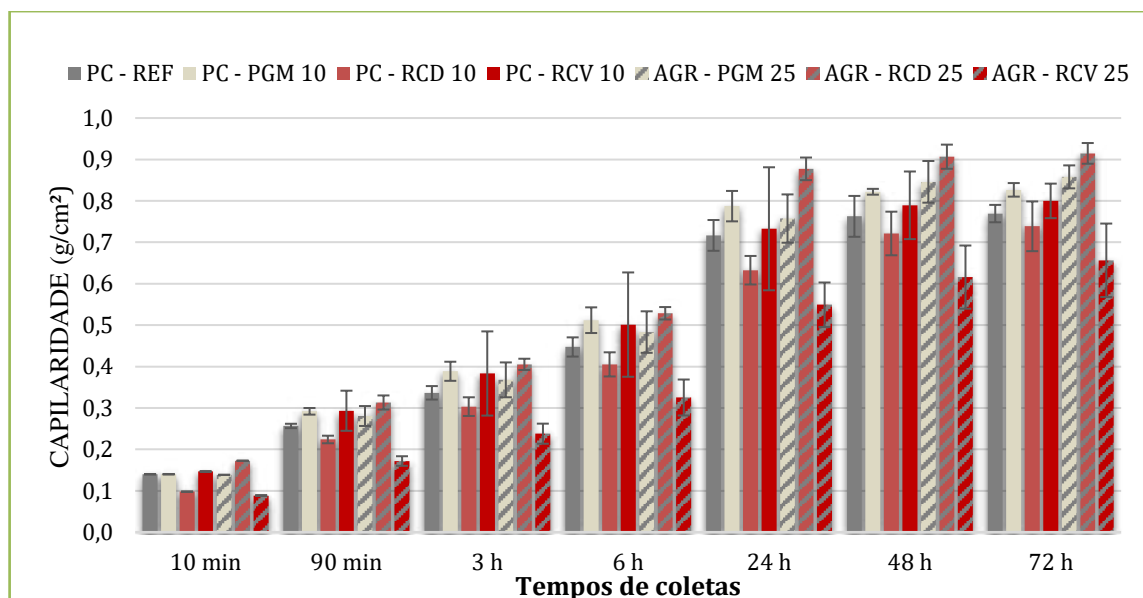


Fonte: Autoria própria (2024)

5.3. ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

5.3.1. Absorção Por Capilaridade

A Figura 30 contém os valores de capilaridade das argamassas ao longo do tempo, expressos em g/cm², permitindo a análise do comportamento de absorção de água para diferentes composições de argamassa.

Figura 30: Absorção por Capilaridade

Fonte: Autoria própria (2024)

Segundo Mehta e Monteiro (2008), o volume de água e cimento presente nas argamassas passa por um processo gradual de transformação em produtos hidratados. Os espaços que não são preenchidos nem pelo cimento nem pelos produtos dessa hidratação são conhecidos como vazios capilares. Segundo Lima (2022) ao substituir parcialmente o cimento pelo RCV, observou-se uma menor demanda de água para a hidratação do cimento. Como resultado, mais água ficou disponível para evaporação, o que gerou um aumento na formação de vazios capilares. Isso tornou a CP-RCV 10 mais permeável e, conseqüentemente, capaz de absorver uma quantidade similar de água em comparação com a CP-REF. O AGR-RCV 25 apresentou resultados satisfatórios no que diz respeito à absorção de água, evidenciando uma menor variação nesse parâmetro. Esse comportamento pode ser atribuído ao fato de o RCV ter preenchido de forma mais eficiente os espaços vazios, o que dificultou a passagem da água pelos poros. O coeficiente de capilaridade das argamassas contendo RCD tende a aumentar à medida que se eleva o percentual de substituição por esse material. Segundo Sousa *et al.* (2015), quanto maior a incorporação de RCD na argamassa, maior será a absorção de água, o que, por sua vez, intensifica o coeficiente de capilaridade.

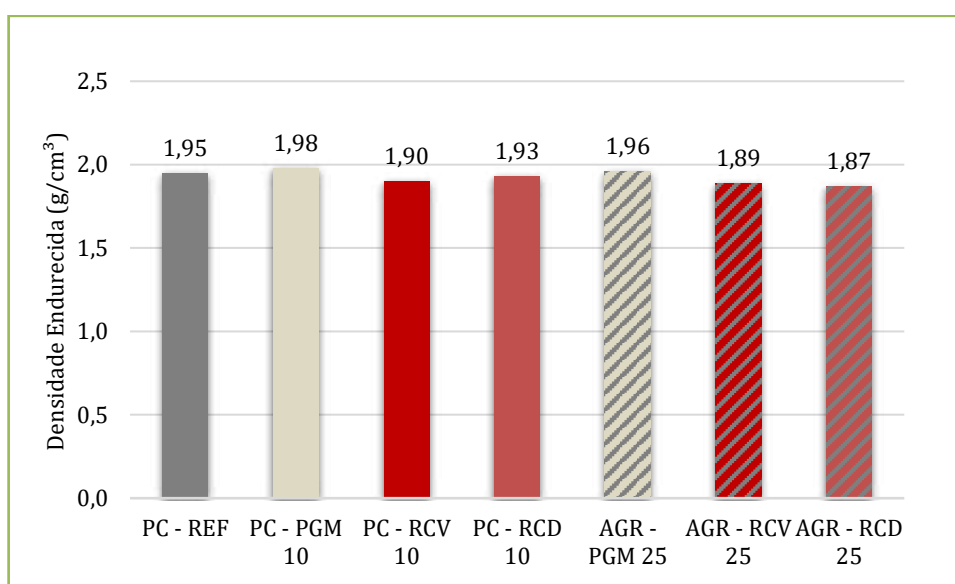
De forma geral, a incorporação de resíduos em argamassas, conforme cresce o teor de substituição do material original pelo resíduo, resulta em um coeficiente de capilaridade mais elevado. A presença de resíduos em argamassas pode intensificar a movimentação da água através de microporos, impactando diretamente nas propriedades de durabilidade do material,

esses vazios capilares, por sua vez, podem influenciar diretamente as propriedades mecânicas das argamassas, como será abordado nos itens 5.4.1 e 5.4.2.

5.3.2. Densidade de Massa no Estado Endurecido

A Figura 31 apresenta os resultados da densidade de massa das argamassas endurecidas aos 28 dias, obtidos por meio de ensaio conforme a norma NBR 13280 (ABNT, 2005).

Figura 31: Densidade de Massa no Estado Endurecido



Fonte: Autoria própria (2024)

Os resultados sugerem que, em geral, nota-se pouca variação na densidade das argamassas. Entretanto, o impacto da substituição parece ser mais notável nas argamassas com RCV e RCD, em comparação com o PGM mantendo uma densidade relativamente um pouco mais elevada. A redução da densidade, como observada nas misturas com maiores teores de resíduos em substituição do agregado, implica numa microestrutura mais porosa, o que diminui a capacidade de resistência mecânica. Logo, as argamassas com PGM, devido à sua maior densidade, podem manter uma boa resistência à compressão, tanto com a substituição parcial do cimento como a do agregado. Já as argamassas com RCV e RCD, especialmente em maiores proporções, apresentam um potencial de redução da resistência, conforme será discutido.

5.4. ENSAIOS DESTRUTIVOS

5.4.1. Resistência a Compressão

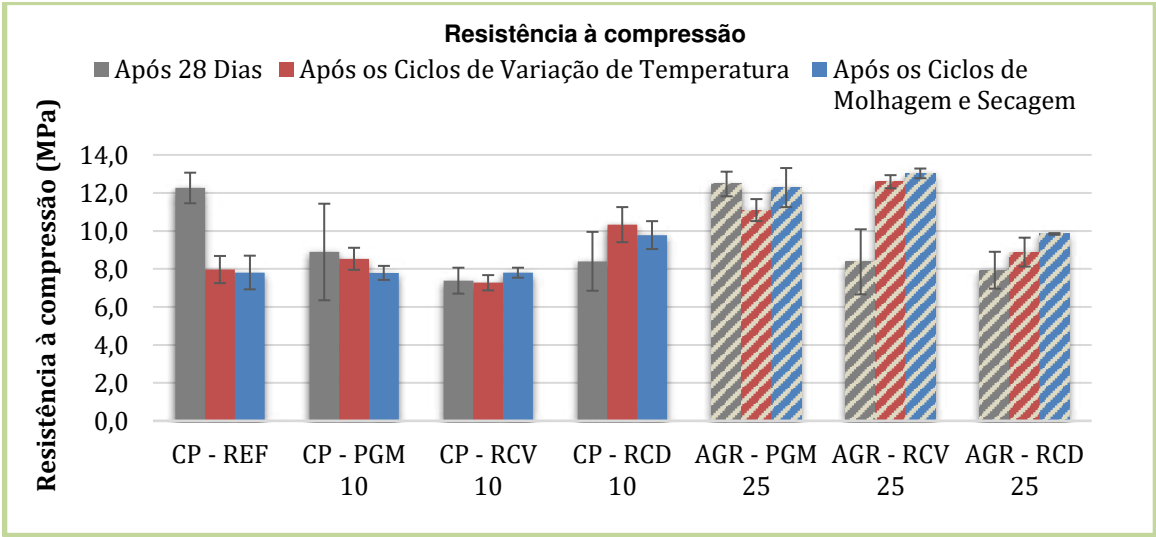
Ao seguir os procedimentos estabelecidos pela NBR 13279 (ABNT, 2005), foram obtidos os valores de resistência à compressão das argamassas com 28 dias e com 30 dias após os ciclos de ataques, conforme apresentado na Tabela 5 e ilustrado graficamente na Figura 32. De acordo com Lisboa, Alves e Melo (2017), a resistência à compressão é a propriedade mecânica de maior relevância para as argamassas de assentamento. Para garantir maior produtividade na obra, é essencial que essa resistência seja adquirida rapidamente, já que as argamassas estão sujeitas a intensos esforços externos. Dessa forma, é crucial que suportem essas tensões sem ocorrerem rupturas.

Tabela 5: Resultados da Compressão Antes e Após os Ciclos

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO			
AMOSTRAS	Após 28 Dias	Após os Ciclos de Variação de Temperatura	Após os Ciclos de Molhagem e Secagem
CP - REF	12,26	7,97	7,81
CP - PGM 10	8,89	8,53	7,79
CP - RCV 10	7,38	7,27	7,80
CP - RCD 10	8,40	10,33	9,78
AGR - PGM 25	12,47	11,10	12,28
AGR - RCV 25	8,37	12,59	13,03
AGR - RCD 25	7,93	8,88	9,84

Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 32: Resultados da Resistência a Compressão



Fonte: Autoria própria (2024)

Os dados obtidos demonstram a influência significativa das condições de exposição na resistência à compressão das argamassas. Após 28 dias, a amostra de referência apresentou uma alta resistência. No entanto, ao ser submetida aos ciclos de variação de temperatura e molhagem e secagem, a resistência caiu significativamente. Essa redução pode ser atribuída ao impacto das variações térmicas e hídricas, que afetam a coesão e a microestrutura da argamassa.

Entre as amostras de substituição parcial do cimento, observou-se uma queda na resistência em relação a argamassa de referência, o que já era esperado devido a diminuição da quantidade de cimento, e uma leve queda na resistência após os ciclos de temperatura e molhagem. A amostra CP - RCD 10 se destacou ao alcançar uma alta resistência após os ciclos de variação de temperatura, o que sugere uma maior estabilidade térmica em comparação com as outras argamassas. Araújo (2017) observou que a redução na resistência à compressão tende a diminuir à medida que aumenta o teor de substituição do aglomerante. Isso ocorre em função da menor quantidade de cimento Portland utilizada e da ausência de produtos de hidratação provenientes do resíduo.

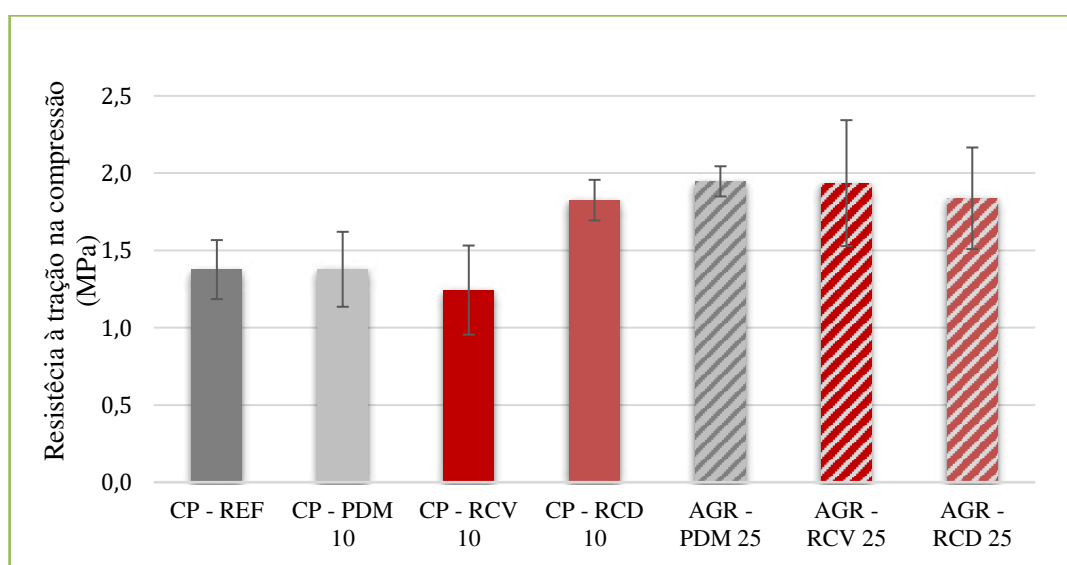
Entre as amostras de substituição parcial do agregado, as argamassas mostraram um desempenho notável. Ou seja, os resíduos tem características de filler e não pozolânicos. A amostra AGR - PGM 25 atingiu a maior resistência entre todas as amostras aos 28 dias, enquanto, após os ciclos de variação de temperatura, sua resistência diminuiu moderadamente. Sales, Sá e Santos (2014) concluíram que a substituição com o teor de 20% do agregado pelo pó de mármore aumentou sua resistência a compressão, assim como os resultados obtidos neste trabalho. A amostra AGR - RCV 25 apresentou uma resistência relativamente baixa aos 28 dias, o que era esperado devido à sua menor densidade no estado seco. Essa característica inicial pode ter influenciado negativamente a resistência à compressão, já que materiais com menor densidade tendem a formar uma estrutura interna mais porosa e menos coesa. No entanto, após os ciclos de variação de temperatura, essa mesma amostra apresentou uma significativa elevação na resistência, destacando-se em comparação com as demais. Provavelmente, os ciclos de variação térmica contribuíram para a reconfiguração de sua microestrutura, fechando poros e aumentando a compactação interna, o que resultou em uma resistência mais elevada. Esse desempenho indica que a argamassa, apesar de sua fragilidade inicial, pode ser mais durável e eficaz em ambientes expostos a variações térmicas similares aos processos empregados neste estudo.

O AGR-RCD 25 apresentou menor resistência à compressão em comparação com as demais argamassas estudadas. Suas características foram semelhantes às do AGR-RCV 25, especialmente a baixa densidade, o que justifica o elevado índice de capilaridade e a maior porosidade observada. Esses fatores podem ter contribuído para a baixa resistência aos 28 dias. No entanto, assim como o AGR-RCV 25, houve um aumento notável na resistência após os ciclos de exposição. Vale destacar que ambas as argamassas possuem RCV em sua composição, o que sugere que esse resíduo apresenta propriedades que melhoram o comportamento das argamassas quando submetidas a condições adversas, uma vez que a cerâmica já passou por um processo de queima.

5.4.2. Tração por Compressão Diametral

A Figura 33 ilustra os resultados obtidos pelo ensaio de tração por compressão diametral realizado aos 28 dias de idade, evidenciando o comportamento mecânico do material testado.

Figura 33: Tração por Compressão Diametral



Fonte: Autoria própria (2024)

Os resultados mostram que a substituição de agregados por resíduos melhora consistentemente a resistência da argamassa, e o RCD, quando utilizado para substituir o cimento, apresenta um comportamento semelhante ao observado nas substituições de agregados. Por outro lado, os resíduos como PGM e RCV, que substituem o cimento, exibem um desempenho ligeiramente inferior ao da referência. No entanto, quando esses resíduos são

utilizados para substituir os agregados, o desempenho melhora significativamente. Esse efeito pode ser atribuído à maior interação e compactação dos resíduos com a matriz da argamassa, principalmente em maiores proporções que pode ser explicado pela presença de finos presentes nos resíduos, o que contribui positivamente para a resistência.

Os desvios padrões observados indicam uma variação aceitável nas medições, sugerindo uma boa reprodutibilidade dos ensaios. Contudo, algumas amostras, como a do AGR-RCD 25, apresentaram uma dispersão um pouco maior, refletindo pequenas variações nos resultados.

6. CONCLUSÃO

Considerando os objetivos desta pesquisa, foram realizados ensaios de caracterização e de caráter destrutivos e não destrutivos, aos 28 dias de idades, para analisar a propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade de argamassas sustentáveis incorporadas com materiais alternativos. Foram testados o pó de pedra (PDP), pó de granito e mármore (PGM), resíduo da construção e demolição (RCD) e resíduo da cerâmica vermelha (RCV) a fim de verificar sua viabilidade para o ramo da construção civil.

Nos ensaios de caracterização, o PGM apresentou uma curva granulométrica bastante satisfatória em relação à curva de referência do PDP. Como consequência, a massa específica desse resíduo mostrou-se mais elevada em comparação com os demais resíduos.

Com base nos resultados dos ensaios não destrutivos, as argamassas contendo PGM se destacaram de maneira geral. Ressalta-se que, nessas formulações, o resíduo foi utilizado tanto para a substituição parcial do cimento quanto do agregado. Essas argamassas alcançaram densidades aparentes de $1,98 \text{ g/cm}^3$ e $1,96 \text{ g/cm}^3$, os maiores valores entre os demais evidenciados. Nos ensaios de absorção por capilaridade, registraram coeficientes de 0,83 e 0,86 g/cm^2 . Embora esses coeficientes não tenham sido os mais baixos, as argamassas com PGM demonstraram maior eficiência no que se refere à densidade.

A respeito das resistências, os dados obtidos mostram que as argamassas com substituição parcial de cimento e agregados respondem de maneiras distintas às condições de variação térmica e hídrica, evidenciando o impacto significativo dos resíduos incorporados em seu desempenho mecânico. Enquanto a redução da resistência à especificação era esperada em amostras com menor teor de cimento, algumas formulações se destacaram, como o CP - RCD 10, que declarou maior estabilidade térmica, e o AGR - PGM 25, que apresentou excelente resistência inicial. Além disso, a elevação na resistência após os ciclos de exposição térmica, especialmente nas amostras AGR - RCV 25 e AGR - RCD 25, demonstrando que esses materiais podem ser mais resistentes em ambientes de variação térmica. A maior compactação interna e o fechamento de poros observados em algumas formulações explicam o aumento da resistência após os ciclos de exposição. Por fim, os desvios padrão aceitáveis reforçam a confiabilidade dos resultados, embora algumas amostras tenham apresentado uma dispersão ligeiramente maior, sinalizando variações no comportamento.

Os ensaios de tração por compressão diametral evidenciaram o impacto positivo da substituição de agregados por resíduos na resistência das argamassas. O uso de RCD como substituto parcial do cimento apresentou um desempenho aprimorado ao das substituições de

agregados, enquanto resíduos como PGM e RCV, quando usados no cimento, apresentaram resultados aprimorados inferiores. Entretanto, ao substituir agregados, esses resíduos resultaram em um desempenho significativamente melhor, reforçando a importância da interação e compactação dos resíduos com a matriz da argamassa.

Por fim, conclui-se que a presença de finos nos resíduos desempenha um papel crucial no aumento da densidade e resistência das argamassas, especialmente quando usados como substitutos do agregado, devido ao efeito filler gerado. Em relação à substituição do cimento por resíduos, os resultados não foram tão satisfatórios, no entanto, dentre os materiais desenvolvidos, o RCD se destacou, apresentando maior resistência após os ciclos de durabilidade. De modo geral, o estudo mais eficaz foi em relação às substituições do agregado, com destaque para o PGM, que demonstrou alta resistência inicial e se manteve após os ensaios de durabilidade. Esse resultado evidencia a importância do controle das taxas de substituição dos materiais. O tipo, a qualidade e a composição dos resíduos podem potencializar as propriedades mecânicas e o desempenho das misturas, contribuindo assim para a adoção de um uso sustentável de resíduos em substituições parciais.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, Rísia Amaral. **Influência da utilização de argamassas vermelhas nas propriedades mistas**. 2017. 96f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

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**. 2 ed. Rio de Janeiro, 2005. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13280: ARGAMASSA PARA ASSENTAMENTO E REVESTIMENTO DE PAREDES E TETOS - DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE DE MASSA APARENTE NO ESTADO ENDURECIDO**. 2 ed. Rio de Janeiro, 2005. 2 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13281-1: ARGAMASSAS INORGÂNICAS — REQUISITOS E MÉTODOS DE ENSAIOS PARTE 1: ARGAMASSAS PARA REVESTIMENTO DE PAREDES E TETOS**. 1 ed. Rio de Janeiro, 2023. 20 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15259: ARGAMASSA PARA ASSENTAMENTO E REVESTIMENTO DE PAREDES E TETOS - DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE E DO COEFICIENTE DE CAPILARIDADE**. 1 ed. Rio de Janeiro, 2005. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR16605: CIMENTO PORTLAND E OUTROS MATERIAIS EM PÓ — DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA**. 1 ed. Rio de Janeiro, 2017. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: CONCRETO - PROCEDIMENTO PARA MOLDAGEM E CURA DE CORPOS DE PROVA**. 2 ed. Rio de Janeiro, 2015. 9 p

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222: CONCRETO E ARGAMASSA — DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL DE CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS**. 3 ed. Rio de Janeiro, 2011. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR12653: MATERIAIS POZOLÂNICOS — REQUISITOS**. 3 ed. Rio de Janeiro, 2014. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR13276: ARGAMASSA PARA ASSENTAMENTO E REVESTIMENTO DE PAREDES E TETOS - DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA**. 3 ed. Rio de Janeiro, 2016. 2 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR13279: ARGAMASSA PARA ASSENTAMENTO E REVESTIMENTO DE PAREDES E TETOS - DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO E À COMPRESSÃO**. 2 ed. Rio de Janeiro, 2005. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR15113: RESÍDUOS SÓLIDOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL E RESÍDUOS INERTES - ATERROS - DIRETRIZES PARA PROJETO, IMPLANTAÇÃO E OPERAÇÃO**. 1 ed. Rio de Janeiro, 2004. 12 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR15575-1: EDIFICAÇÕES HABITACIONAIS — DESEMPENHO PARTE 1: REQUISITOS GERAIS**. 6 ed. Rio de Janeiro, 2024. 95 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR16697: CIMENTO PORTLAND - REQUISITOS**. 1 ed. Rio de Janeiro, 2018. 12 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR16972: AGREGADOS - DETERMINAÇÃO DA MASSA UNITÁRIA E DO ÍNDICE DE VAZIOS**. 1 ed. Rio de Janeiro, 2021. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR7211: AGREGADOS PARA CONCRETO - REQUISITOS**. 4 ed. Rio de Janeiro, 2022. 10 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR7215: CIMENTO PORTLAND - DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS**. 2 ed. Rio de Janeiro, 2019. 12 p.

AZEVEDO, Afonso Rangel Garcez de; ALEXANDRE, Jonas; ZANELATO, Euzebio Bernabé; MARVILA, Markssuel Texeira; MONTEIRO, Sergio Neves; XAVIER, Gustavo de Castro; ANTUNES, Maria Lúcia Pereira; FRANÇA, Bruno Rangel; FERNANDES JUNIOR, Wellington. **ESTUDO DO EFEITO DE CICLOS DE MOLHAGEM E SECAGEM NA DURABILIDADE DE ARGAMASSAS COM ADIÇÃO DE RESÍDUO DA PRODUÇÃO DE PAPEL**, p. 3042-3047. In: *72nd ABM Annual Congress*, São Paulo, 2017. ISSN: 2594-5327, DOI 10.5151/1516-392X-30820.

BAUER, L. A. Falcão. **Materiais de Construção**. 6. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2019. 568 p.

BINS, Gabriel de Oliveira *et al.* **Análise de pisos intertravados com substituição do agregado miúdo por resíduo de construção e demolição**. *Revista Principia-Divulgação Científica e Tecnológica do Ifpb*, São Carlos, v. 59, n. 2, p. 427-444, 2022.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Resolução n.º 307, de 05 de julho de 2002. **Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 17 jul. 2002.

CAMPOS, Beliato Santana *et al.* **CARACTERIZAÇÃO DE RESÍDUOS MINERAIS VISANDO APLICAÇÃO NA INDÚSTRIA CERÂMICA**. **Quipá Editora**, Iguatu, v. 1, p. 0-123, maio 2021. Quipá Editora. <http://dx.doi.org/10.36599/qped-ed1.052>.

CANEDO, Aline Crispim; BRANDÃO, Fernando Buiate; PEIXOTO FILHO, Fernando Luiz. **REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO NA PRODUÇÃO DE ARGAMASSA DE REVESTIMENTO**. 2011. 83 f. TCC (Graduação) - Curso de Curso

de Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2011.

CARASEK, Helena. Argamassas. In: ISAIA, Geraldo Cechella. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 2. ed. São Paulo, IBRACON, 2010. Cap. 28. p. 893-943.

COSTA, Marcus Luiz Alves dos Santos et al. . Análise das características do concreto com a substituição do agregado miúdo natural por resíduos sólidos industriais. **Rev. ALCONPAT**, Mérida , v. 12, n. 3, p. 328-346, dic. 2022 . Disponível em <http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-68352022000300328&lng=es&nrm=iso>. accedido em 04 oct. 2024. Epub 08-Abr-2024. <https://doi.org/10.21041/ra.v12i3.573>.

FARIAS FILHO, João de; ROLIM, Joselma Santos; TOLEDO FILHO, Romildo Dias. **Potencialidades da metacaolinita e do tijolo queimado moído como substitutos parciais do cimento Portland**. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, [S.L.], v. 4, n. 3, p. 437-444, dez. 2000. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1415-43662000000300021>.

FARIAS FILHO, João de; TOLEDO FILHO, Romildo D.; LIMA, Paulo R. L.. **Efeito da argila calcinada sobre a durabilidade de argamassas reforçadas com fibras curtas de sisal**. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, [S.L.], v. 14, n. 10, p. 1109-1114, out. 2010. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1415-43662010001000013>.

FÉLIX, Joilson de Souza. **DURABILIDADE DAS ARGAMASSAS SUSTENTÁVEIS PRODUZIDAS COM MATERIAIS REGIONAIS**. 2023. 68 f. TCC (Graduação) - Curso de Bacharelado em Ciência e Tecnologia, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal Rural do Semi Árido, Caraúbas, 2023.

GRAEFF, Ângela Gaio. **AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL E MODELAGEM DOS EFEITOS ESTRUTURAIS DA PROPAGAÇÃO DA CORROSÃO EM ELEMENTOS DE CONCRETO ARMADO**. 2007. 163 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenha, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

HOPPE FILHO, J.; SOUZA, D. J.; MEDEIROS, M. H. F.; PEREIRA, E.; PORTELLA, K. F.. **Ataque de matrizes cimentícias por sulfato de sódio: adições minerais como agentes mitigadores**. *Cerâmica*, [S.L.], v. 61, n. 358, p. 168-177, jun. 2015. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132015613581905>.

IBGE. **Pesquisa anual da indústria da construção**. Rio de janeiro: IBGE, 2021. Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/54/paic_2021_v31_informativo.pdf. Acesso em: 14 de março de 2024.

LIMA, Rian Dutra de. **POTENCIALIDADE DO USO DO RESÍDUO DA CERÂMICA VERMELHA E DO PÓ DE PEDRA NA PRODUÇÃO DE ARGAMASSAS SUSTENTÁVEIS**. 2022. 61 f. TCC (Graduação) - Curso de Bacharelado em Ciência e Tecnologia, Centro Multidisciplinar de Caraúbas, Universidade Federal Rural do Semi Árido, Caraúbas, 2022.

LISBOA, E. L.; ALVES, E. S.; MELO, G. A. Materiais de construção: concreto e argamassa - 2. Ed. – Porto Alegre: SAGAH, 2017.

LUCAS, Denis; BENATTI, Cláudia Telles. **Utilização de resíduos industriais para a produção de artefatos cimentícios e argilosos empregados na construção civil.** Revista em agronegócio e meio ambiente, v. 1, n. 3, p. 405-418, 2008.

MACEDO, Jeandson Wilck Nogueira de. **Argamassa de revestimento Produzida a partir da substituição do agregado natural por resíduo de scheelita e pó de pedra.** 2021. 94 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal - RN, 2021.

MARVILA, Markssuel T.; AZEVEDO, Afonso R.G.; CECCHIN, Daiane; COSTA, Jônatas M.; XAVIER, Gustavo C.; CARMO, Dirlane de Fátima do; MONTEIRO, Sergio N.. Durability of coating mortars containing açai fibers. Case Studies In Construction Materials, [S.L.], v. 13, p. 406, dez. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00406>.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: microestrutura, propriedades e materiais. São Paulo: Ibracon, 2008. 674 p.

MENDES, Bruno Silva; BORJA, Edilberto Vitorino de. ESTUDO EXPERIMENTAL DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DE ARGAMASSAS COM ADIÇÃO DE RESÍDUOS DE CERÂMICAS VERMELHAS RECICLADAS. **HOLOS**, [S. l.], v. 3, p. 43–51, 2008. DOI: 10.15628/holos.2007.127. Disponível em: <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/127>. Acesso em: 7 out. 2024.

MENEZES, Romualdo R. et al. Reciclagem de resíduos da construção civil para a produção de argamassas. **Cerâmica**, v. 55, p. 263-270, 2009.

OLIVEIRA, Maria Alanya da Costa de. **INFLUÊNCIA DO TEMPO DE MOAGEM NA POTENCIALIDADE DE INCORPORAÇÃO DO RESÍDUO DE CERÂMICA VERMELHA EM SOLO CIMENTO.** 2019. 58 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro Multidisciplinar Pau dos Ferros, Universidade Federal Rural do Semi Árido, Pau dos Ferros, 2019.

OLIVEIRA, Maria Helena Silva de. **POTENCIALIDADE DO USO DO CAULIM E DO PÓ DE PEDRA NA PRODUÇÃO DE ARGAMASSAS SUSTENTÁVEIS.** 2022. 63 f. TCC (Graduação) - Curso de Bacharelado em Ciência e Tecnologia, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal Rural do Semi Árido, Caraúbas, 2022.

PAES, Isaura Nazaré Lobato; CARASEK, Helena. Desempenho das argamassas de rejuntamento no sistema de revestimento cerâmico. **Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 2, n. 2, p. 93-103, jun. 2002.

POLIMIX. **FICHA DE INFORMAÇÕES DE SEGURANÇA DE PRODUTOS QUÍMICOS - FISPQ (ABNT NBR 14725).** 5. ed. Pacatuba: Fispq, 2018. 8 p.

POSSAN, Edna; DEMOLINER, Carlos Alberto. **Desempenho, durabilidade e vida útil das edificações: abordagem geral.** Revista técnico-científica, n. 1, 2013.

RIBEIRO, Carmem Couto; PINTO, Joana Darc da Silva; STARLING, Tadeu. **Materiais de Construção Civil**. 2. ed. Belo Horizonte: Ufmg, 2002. 102 p.

SALES, Angela Tereza Costa; SÁ, Bárbara Ramos Carvalhos de; SANTOS, Débora de Góis. ARGAMASSAS COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO MIÚDO POR PÓ DE MÁRMORE. **Entac**, Maceió, v. 1, n. 1, p. 2472-2481, nov. 2014

SANTOS, Liane Ferreira dos; REAL, Ligia Vitória; LOPES, Karina Leonetti. **Materiais de Construção Civil II**. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A, 2018. 208 p.

SANTOS, Maria Luiza Lopes de Oliveira. **Aproveitamento de resíduos minerais na formulação de argamassas para a construção civil**. 2008. 165 f. Tese (Doutorado em Processamento de Materiais a partir do Pó; Polímeros e Compósitos; Processamento de Materiais a part) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

SCHMALZ, Rosana. **Durabilidade de argamassas submetidas ao ataque de sulfatos: efeito da adição da nanosílica**. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2018.

SENTENA, Jeferson Alcantara Alves. **Discussão sobre métodos acelerados para a avaliação do envelhecimento de revestimentos de argamassas submetidos a ciclos térmicos: aplicação em argamassa com fíler de concreto**. 2015. 156 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade do Vale do Rio dos Sino, São Leopoldo, 2015.

SILVA, Deivison Taemy Dias da. **POTENCIALIDADE DO USO DO PÓ DE MÁRMORE E DO PÓ DE PEDRA NA PRODUÇÃO DE ARGAMASSAS SUSTENTÁVEIS**. 2022. 62 f. TCC (Doutorado) - Curso de Bacharelado em Ciência e Tecnologia, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal Rural do Semi Árido, Caraubas, 2022.

SIMÕES, Edervane dos Santos; SILVA, Mauricio Messias da. **Análise comparativa entre a resistência à compressão da argamassa preparada com cal hidratada com a argamassa preparada com agrofilito**. 2016. 67 f. TCC (Graduação) - Curso de Bacharelado em Engenharia Civil, Instituto Doctum de Engenharia e Tecnologia, Caratinga- Mg, 2016

SOARES, S.M.; OLIVEIRA JÚNIOR, A.; FREITAS, T. A. G.; FERREIRA, F. G. S.; SALVADOR FILHO, J. A. A. **Compósitos cimentícios de ultra alto desempenho com a incorporação de diversos teores de pó de vidro**. 4º Simpósio Paranaense de Patologia das Construções (4º SPPC), artigo 4SPPC116, pp. 136 – 146, 2019. DOI: 10.4322/2526-7248.036

SOUSA, R. C. de; FELIPE, A. M.; FRANÇA, G. F de; COUTINHO, P. A.; SOUZA, J. A. **Estudo da influência da adição de cinza volante e resíduo da construção civil nas propriedades da argamassa**. XI Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica. Unicamp – Campinas/SP, 2015. DOI: 10.5151/chemeng-cobeqic2015-427-34046-261960.

TAVARES, Jennef C.; LUCENA, Luciana F.L.; HENRIQUES, Glauco F.; FERREIRA, Ruan L.s.; ANJOS, Marcos A.s. dos. **Use of banana leaf ash as partial replacement of Portland**

cement in eco-friendly concretes. Construction And Building Materials, [S.L.], v. 346, p. 12, set. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128467>.

VIEIRA, Samara Beatriz da Silva. **POTENCIALIDADE DO USO DO RESÍDUO DA CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO E DO PÓ DE PEDRA NA PRODUÇÃO DE ARGAMASSAS SUSTENTÁVEIS**. 2022. 60 f. TCC (Graduação) - Curso de Bacharelado em Ciência e Tecnologia, Centro Multidisciplinar de Caraúbas, Universidade Federal Rural do Semi Árido, Caraúbas, 2022.