

ISIS MORAIS CRUZ SOUZA

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE CONCRETO COM  
INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE MARMORARIA**

SALVADOR-BA

2025

ISIS MORAIS CRUZ SOUZA

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE CONCRETO COM  
INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE MARMORARIA**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais (PPGEM) do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia (IFBA) como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Mirtânia Antunes Leão  
Coorientador: Prof. Dr. Aldemiro José Rocha Palma

SALVADOR-BA

2025

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELO SISTEMA DE BIBLIOTECAS DO IFBA, COM OS  
DADOS FORNECIDOS PELO(A) AUTOR(A)

S729d Souza, Isis Morais Cruz

Desenvolvimento e caracterização de concreto com incorporação de resíduos de marmoraria / Isis Morais Cruz Souza; orientadora Mirtânia Antunes Leão; coorientador Aldemiro José Rocha Palma -- Salvador, 2025.

71 p.

Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais) -- Instituto Federal da Bahia, 2025.

1. Sustentabilidade. 2. Beneficiamento. 3. Resíduo de marmoraria. 4. Concreto. I. Leão, Mirtânia Antunes, orient. II. Palma, Aldemiro José Rocha, coorient. III. TÍTULO.

CDU 691.32

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA BAHIA  
R. Emídio dos Santos - Bairro Barbalho - CEP 40301-015 - Salvador - BA - www.portal.ifba.edu.br

**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS - PPGEM**

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE CONCRETO COM INCORPORAÇÃO DE  
RESÍDUOS DE MARMORARIA**

ISIS MORAIS CRUZ SOUZA

Produto(s) Gerado(s): (  ) Dissertação (  ) Relatório Técnico (  ) Publicação em Periódico  
(  ) Artigo Técnico (  ) Patente (  ) Registro de software (  ) Outro: especificar

Orientadora: Profa. Dra. Mirtânia Antunes Leão – PPGEM/IFBA

Coorientador: Prof. Dr. Aldemiro José Rocha Palma – IFBA

Banca examinadora:

Profa. Dra. Mirtânia Antunes Leão

Orientadora do PPGEM – Instituto Federal da Bahia – IFBA

Prof. Dr. Aldemiro José Rocha Palma

Coorientador – Instituto Federal da Bahia – IFBA

Prof. Dr. Luiz Antonio Pimentel Cavalcanti

Examinador Interno ao PPGEM – Instituto Federal da Bahia – IFBA

Prof. Dr. Adriano Silva Fortes

Examinador Externo ao PPGEM – Instituto Federal da Bahia – IFBA

Prof. Dr. Eduardo Parente Prado

Examinador Externo – Universidade Federal da Bahia – UFBA/UNEB

Prof. Dr. Rubens Maribondo do Nascimento

Examinador Externo – Universidade federal do Rio Grande do Norte – UFRN

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado pela banca examinadora em 26 / 02 /2024.



Documento assinado eletronicamente por **MIRTANIA ANTUNES LEAO, Professor Efetivo**, em 06/03/2025, às 10:46, conforme decreto nº 8.539/2015.



Documento assinado eletronicamente por **RUBENS MARIBONDO DO NASCIMENTO, Usuário Externo**, em 06/03/2025, às 17:47, conforme decreto nº 8.539/2015.



Documento assinado eletronicamente por **Eduardo Parente Prado, Usuário Externo**, em 07/03/2025, às 14:19, conforme decreto nº 8.539/2015.



Documento assinado eletronicamente por **ALDEMIRO JOSE ROCHA PALMA, Professor(a) do Magistério Superior**, em 07/03/2025, às 18:10, conforme decreto nº 8.539/2015.



Documento assinado eletronicamente por **LUIZ ANTONIO PIMENTEL CAVALCANTI, Professor(a) do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico - EBTT**, em 12/03/2025, às 14:37, conforme decreto nº 8.539/2015.



Documento assinado eletronicamente por **ADRIANO SILVA FORTES, Coordenador(a) do Curso de Edificações**, em 12/04/2025, às 15:43, conforme decreto nº 8.539/2015.



A autenticidade do documento pode ser conferida no site [http://sei.ifba.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&acao\\_origem=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ifba.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&acao_origem=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0) informando o código verificador **4031758** e o código CRC **2F028D97**.

## **DEDICATÓRIA**

**À Deus por me fortalecer e sustentar em meio às adversidades. Aos meus pais, Otailson e M<sup>a</sup> Auxiliadora, pelos princípios e valores a mim ensinados. E às minhas filhas, Maria Clara e Marina, por todo amor e paciência, nos momentos difíceis.**

## AGRADECIMENTOS

Sou grata primeiramente a Deus, por todas as oportunidades, guiando-me em todos os caminhos de minha vida.

Agradeço em seguida a meus pais, minha irmã e especialmente às minhas filhas Maria Clara e Marina, por todo amor e incentivos aos meus estudos e trabalhos profissionais.

Também agradeço a todos que me apoiaram e se envolveram direta e indiretamente na execução deste projeto:

À minha orientadora, professora Dr<sup>a</sup>. Mirtânia Antunes Leão, por sua orientação, incentivo e acolhimento em seu grupo de pesquisa;

Ao meu coorientador, professor Dr. Aldemiro José Rocha Palma, por todo auxílio intelectual e prático nos experimentos deste trabalho, inclusive com a aquisição de parte dos materiais utilizados;

Aos meus colegas do Grupo de Pesquisa em Compósitos Poliméricos e Cerâmicas pelo apoio dado sempre que necessário, especialmente aos colegas Íbsen Sales, Carla Tainara de Oliveira Lima e professor Me. Rafael Pacheco Evangelista, por ter me auxiliado na confecção dos corpos de prova e ensaios de realização dos ensaios de compressão;

Aos técnicos e demais colaboradores do Departamento Acadêmico de Tecnologia Mecânica (DATM) do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia (IFBA), especialmente a Carina Soares do Nascimento pela ajuda com as microscopias eletrônicas de varredura;

Ao professor Dr. Adriano Silva Fortes, do Departamento Acadêmico de Construção Civil (DACCIVIL) do IFBA, por ter permitido o uso de seus laboratórios e por ter tirado dúvidas que surgiram ao longo do trabalho;

Aos professores Dr. Eduardo Parente Prado da UFBA, e Dr. Rubens Alves Dantas da UFPE, além dos demais membros da banca, já citados anteriormente, por terem aceitado o convite para participar da avaliação deste trabalho, contribuindo com a versão final apresentada, através das sugestões dadas.

E agradeço finalmente a todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais (PPGEM) do IFBA, por serem os grandes responsáveis pela existência do programa.

**“Nossa maior fraqueza está em desistir. O caminho mais certo de vencer é tentar mais uma vez.”**

**Thomas Edison**

## RESUMO

Preconizado pela sustentabilidade ambiental, a preocupação atual em todo o planeta se refere à destinação final dos resíduos sólidos gerados pelos diversos processos de produção, em especial os industriais, que nas suas etapas da cadeia produtiva, geram resíduos intermediários considerados passivos ambientais. A reciclagem e o aproveitamento de tais resíduos têm sido incentivados e se insere como sendo uma das grandes alternativas para reduzir tais impactos ao meio ambiente, além de reduzir o consumo crescente de matérias-primas *in natura* imposto pela demanda de produção. O pó residual do beneficiamento da serragem de rochas ornamentais representa neste contexto, uma grande atenção parte das empresas e órgãos ambientais, devido ao seu grande montante de resíduos gerados, depositados de forma irregular, na maioria das vezes, em aterros, terrenos baldios e outras áreas urbanas e rurais, trazendo prejuízos à sociedade e ao ambiente. Este trabalho teve por finalidade desenvolver a produção de concreto com incorporação de resíduos de marmoraria, oriundo do processamento de serragem de rochas ornamentais convencionais em substituição do agregado areia natural. Foram obtidas as propriedades físicas das matérias primas convencionais, e caracterização física, química e mineralógica do resíduo coletado para beneficiamento, assim como as características mecânicas e microestruturais dos concretos produzidos. Foram moldados corpos de prova cilíndricos nas dimensões de 15 cm de diâmetro e 20 cm de altura com substituição parcial do agregado miúdo por resíduo de marmoraria nos teores de 10%, 20%, 30% e foram determinadas, à resistência a compressão axial simples nas idades de 7 e 28 dias, determinação do módulo de elasticidade, teor de absorção de água e análise microscópica dos concretos desenvolvidos. Observou-se que a substituição do agregado miúdo por resíduo de marmoraria possibilitou a obtenção de um concreto com propriedades que atendem aos parâmetros normativos, destacando o aumento da resistência mecânica no percentual no traço com 20% de substituição do agregado miúdo aos 28 dias, assim como aumento do módulo de elasticidade, e a redução da absorção de água. As imagens de microscópio eletrônico de varredura (MEV) revelaram redução de porosidade no traço do concreto de 20% de substituição do traço do concreto, e a formação de silicatos de cálcio hidratado e a formação de etringita na fase cristalográfica. Os resultados apontam para a viabilidade da utilização do resíduo de marmoraria como substituição parcial da areia natural.

**Palavras-Chaves:** Sustentabilidade, Beneficiamento. Resíduo de marmoraria. Concreto.

## ABSTRACT

Advocated by environmental sustainability, the current concern across the planet refers to the final destination of solid waste generated by various production processes, especially industrial ones, which in their stages of the production chain, generate intermediate waste considered environmental liabilities. Recycling and the use of such waste have been encouraged and are included as one of the great alternatives to reduce such impacts on the environment, in addition to reducing the growing consumption of raw materials in natura imposed by the production demand. In this context, the residual powder from the processing of ornamental rock sawdust is a major concern for companies and environmental agencies, due to the large amount of waste generated, which is often deposited irregularly in landfills, vacant lots and other urban and rural areas, causing harm to society and the environment. This study aimed to develop the production of concrete with the incorporation of marble waste from the processing of conventional ornamental rock sawdust, replacing the natural sand aggregate. The physical properties of the conventional raw materials were obtained, as well as the physical, chemical and mineralogical characterization of the waste collected for processing, as well as the mechanical and microstructural characteristics of the concrete produced. Cylindrical test specimens measuring 15 cm in diameter and 20 cm in height were molded with partial replacement of the fine aggregate by marble waste at levels of 10%, 20%, 30% and the resistance to simple axial compression at ages of 7 and 28 days, determination of the modulus of elasticity, water absorption level and microscopic analysis of the concretes developed were determined. It was observed that the replacement of fine aggregate by marble waste made it possible to obtain concrete with properties that meet the normative parameters, highlighting the increase in mechanical strength in the percentage in the mix with 20% replacement of fine aggregate at 28 days, as well as an increase in the modulus of elasticity, and a reduction in water absorption. The scanning electron microscope (SEM) images revealed a reduction in porosity in the concrete mix with 20% replacement of the concrete mix, and the formation of hydrated calcium silicates and the formation of ettringite in the crystallographic phase. The results indicate the viability of using marble waste as a partial replacement for natural sand.

**Keywords:** Sustainability, Processing. Marblewaste. Concrete.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Disposição inadequada dos rejeitos da lavra .....	19
Figura 2 – Lama abrasiva no tanque de decantação antes da coleta para beneficiamento.....	28
Figura 3 – Estufa utilizada para secagem do RM.....	29
Figura 4 – Componentes utilizados na produção do concreto.....	30
Figura 5 – Fluxograma da metodologia.....	31
Figura 6 – Difratorômetro de Raios-x utilizado para análise mineralógica.....	33
Figura 7 – Espectrômetro de Raios-x utilizado para análise de composição química.....	34
Figura 8 – Aparelho mecânico utilizado para ensaio de granulometria.....	34
Figura 9 – Mistura pronta (concreto).....	37
Figura 10– Fôrmas cilíndrica utilizada nas moldagens .....	37
Figura 11– Material moldado nas fôrmas cilíndricas.....	38
Figura 12– Corpos de prova cobertos por lona plástica.....	38
Figura 13 –Corpos de prova imerso em água.....	39
Figura 14 –Corpos de prova desmoldados após processo de hidratação.....	39
Figura 15– Molde utilizado no ensaio de consistência.....	40
Figura 16– Prensa universal utilizada no ensaio de resistência a compressão.....	41
Figura 17– Secagem dos corpos de prova na estufa por 72h.....	43
Figura 18– Coleta da massa do corpo de prova em balança digital.....	43
Figura 19– Corpos de prova submerso para absorção de água.....	43
Figura 20 – Ilustração da fase de hidratação do concreto.....	45
Figura 21 – Processo de recobrimento da amostra para o ensaio MEV.....	45
Figura 22 – Microscópio Eletrônico de Varredura utilizado.....	46
Figura 23 – Micrografia ilustrando zona de transição entre matriz e agregado do concreto...60	
Figura 24 – Micrografia ilustrando a porosidade do concreto.....	61
Figura 25 – Micrografia ilustrando a zona cristalográfica do concreto.....	62

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Geração de RCD no Brasil.....	18
Gráfico 2 – Perfil da produção brasileira por tipo de rocha em 2023.....	22
Gráfico 3 – Curva do resultado de Difratomia de Raio-x.....	50
Gráfico 4 - Curva granulométrica da areia.....	50
Gráfico 5– Curva granulométrica do RM.....	50
Gráfico 6 - Curva granulométrica da brita 0.....	52
Gráfico 7– Comparação dos resultados do ensaio de compressão axial.....	56
Gráfico 8- Comparação dos resultados do ensaio de módulo de elasticidade.....	57
Gráfico 9– Comparação dos resultados do ensaio de absorção de água.....	58

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Distribuição da produção de rochas ornamentais e de revestimento no Brasil.....	23
Tabela 2 – Caracterização física dos agregados miúdos.....	32
Tabela 3 – Caracterização física do agregado graúdo.....	35
Tabela 4 – Traços em volume dos concretos produzidos.....	36
Tabela 5 – Caracterização física e química do aglomerante.....	47
Tabela 6 – Composição química a partir da análise de FRX.....	49
Tabela 7 – Resultado do ensaio de granulometria dos agregados miúdos.....	51
Tabela 8– Resultado da caracterização física dos agregados miúdos.....	51
Tabela 9– Caracterização física do agregado graúdo.....	53
Tabela 10– Caracterização do aditivo químico.....	54
Tabela 11– Resultados do ensaio de consistência do concreto.....	54
Tabela 12– Resultados do ensaio de resistência a compressão axial .....	55
Tabela 13 - Resultados do ensaio de módulo de elasticidade.....	57
Tabela 14– Resultado do ensaio de absorção de água.....	58

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABIROCHAS	Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABREMA	Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
C-S-H	Silicato de Cálcio Hidratado
Ca(OH) <sub>2</sub>	Hidróxido de Cálcio Hidratado
CP-V- ARI	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
DRX	Difração de Raios-X
IBM	Instituto Brasileiro de Mineração
ICDD	International Center for Diffraction Data
FRX	Fluorescência de Raios-X
IBRACON	Instituto Brasileiro de Concreto
IFBA	Instituto Federal da Bahia
RCD	Resíduo de Construção e Demolição
RM	Resíduo de Marmoraria
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
NBR	Normas Brasileira de Regulamentação
IFBA	Instituto Federal da Bahia
UFBA	Universidade Federal da Bahia
UFRN	Universidade Federal do Rio Grande do Norte

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>14</b>
1.1.	JUSTIFICATIVAS.....	16
1.2.	OBJETIVOS.....	16
1.2.1.	Objetivo Geral.....	16
1.2.2.	Objetivos específicos.....	16
<b>2.</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>17</b>
2.1.	CONCRETO: COMPOSIÇÃO E PROPRIEDADES.....	17
2.2.	APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS EM CONCRETO.....	17
2.2.1.	Aproveitamento de resíduos de rochas ornamentais.....	22
2.2.2.	Vantagens e Desvantagens.....	24
2.3.	SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	26
<b>3.</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>27</b>
3.1.	MATERIAIS.....	27
3.1.1.	Aglomerante.....	28
3.1.2.	Agregado miúdo.....	28
3.1.2.1.	Areia natural.....	28
3.1.2.2.	Resíduo de marmoraria.....	28
3.1.3.	Agregado graúdo.....	29
3.1.4.	Água.....	30
3.1.5.	Aditivo.....	30
3.2.	MÉTODOS.....	31
3.2.1.	Caracterização do Aglomerante.....	32
3.2.2.	Caracterização dos Agregados.....	32
3.2.2.1.	Análise mineralógica por difração de raios-x .....	33
3.2.2.2.	Análise composição química por fluorescência de raio-x FRX.....	33
3.2.2.3.	Granulometria.....	34
3.2.2.4.	Massa específica.....	35
3.2.2.5.	Massa unitária.....	35
3.2.3.	Caracterização do aditivo.....	35
3.2.4.	Produção do concreto.....	35
3.2.4.1.	Definição do traço de referência.....	35
3.2.4.2.	Moldagem dos corpos de prova.....	36
3.2.4.3.	Processo de hidratação.....	38
3.2.5.	Caracterização do concreto fresco.....	40
3.2.5.1.	Determinação da consistência.....	40

3.2.6.	Caracterização do concreto endurecido.....	40
3.2.6.1.	Resistência a compressão axial.....	40
3.2.6.2.	Módulo de elasticidade.....	41
3.2.6.3.	Teor de absorção de água.....	42
3.2.6.4.	Microscopia Eletrônica de Varredura.....	44
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>46</b>
4.1.	Aglomerante.....	46
4.2.	Agregado miúdo.....	47
4.3.	Agregado graúdo.....	52
4.4.	Aditivo químico.....	53
4.5.	Caracterização do concreto no estado fresco.....	54
4.5.1.	Consistência.....	54
4.6.	Caracterização do concreto no estado endurecido.....	55
4.6.1.	Resistência compressão axial.....	57
4.6.2.	Módulo de elasticidade.....	57
4.6.3.	Absorção de água.....	58
4.6.4.	Análise de microscopia eletrônica de varredura.....	59
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>63</b>
<b>6.</b>	<b>TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>65</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>66</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O concreto é o material mais utilizado no setor da construção civil, logo depois da água. Sendo um elemento heterogêneo composto por cimento, água e agregados miúdos (areia) e agregados graúdos (brita), podendo ainda ser acrescentado aditivos para melhorar o desempenho do material, alterando suas propriedades. Após serem misturados manualmente ou mecanicamente, esses componentes são transformados no material que desempenham importante finalidade de contribuir na edificação com resistência e segurança para a sociedade (ABCP, 2024).

Desde o século XVII, na Inglaterra quando foi originado o concreto, este composto vem sendo utilizado em construção de edificações, pavimentações e urbanismo, assim como em esculturas de arte por ser material de fácil modelagem em estado fresco. Até então, são utilizados com adição de aço, fibras e resíduos que podem aumentar a resistência e durabilidade do produto esperado.

Devido a variação de aplicação no mundo, diversos resíduos vêm sendo aproveitados como beneficiamento e aproveitamento de forma a reduzir a extração de matéria-prima da natureza para sua composição. Dentre vários resíduos, têm-se o resíduo gerado a partir da serragem de rochas para utilização de bancadas e revestimentos de piso e parede, como pias e divisórias em mármore e granito por exemplo. Entretanto, a inexistência de uma normatização para a utilização do pó de mármore e granito como agregado miúdo tem por consequência uma dificuldade de padronização e controle de qualidade dos concretos produzidos a partir desse material (ABIROCHAS, 2024).

Com o objetivo de promover a redução, a utilização, a reciclagem e a destinação final adequada dos resíduos da construção civil no Brasil, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) regulamentou através da resolução 307/2022, diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão de resíduo de construção civil - RCC contribuindo para a preservação do meio ambiente e a promoção da sustentabilidade no setor da construção civil.

O relatório “Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2024” da ABREMA (2024) ajuda a entender a dimensão do problema de gestão de resíduos sólidos no Brasil. Dentre vários tipos de resíduos gerados, ele mostra que foi coletado 48.375.275 toneladas de resíduo de construção e demolição – RCD, representando crescimento de 2,9% em relação ao período anterior. Sendo registrado coleta por habitante cerca de 227 kg por ano, em boa parte, equivalente a resíduos de construção e demolição abandonados em vias e logradouros

públicos. A região Nordeste se destaca em segundo lugar como maior geradora de RCD, após a região sudeste, com 9.481.605 toneladas.

Nos últimos 50 anos, a extração de recursos naturais triplicou, impulsionada pela expansão da infraestrutura e pelo alto consumo de materiais, especialmente em países de renda média-alta e alta. De acordo com um relatório do Painel Internacional de Recursos da ONU, essa extração está projetada para aumentar 60% até 2060. Tal crescimento pode comprometer as metas globais relacionadas ao clima, biodiversidade, poluição, além de impactar negativamente a prosperidade econômica e o bem-estar humano (PNUMA, 2024).

Diversas pesquisas vêm sendo desenvolvidas (DE ARAUJO, 2020; CARVALHO et al., XIE, 2023; BATISTA, 2024) para verificar a viabilidade técnica-econômica do resíduo de mármore e granito na produção de argamassas, concretos convencionais e autoadensáveis, visando ampliar a área de estudo do emprego desse material. Resultados indicam que a incorporação dos resíduos de rochas ornamentais em materiais cerâmicos resulta em melhorias nas propriedades tecnológicas, como menor absorção de água e maior resistência mecânica. Os resíduos de rochas ornamentais têm aplicações promissoras na indústria da construção civil, proporcionando benefícios significativos ao material (AMORIM, 2023).

Esta pesquisa, propõe um estudo de análise de incorporação do resíduo de marmoraria– RM, em substituição parcial à areia natural na fabricação de concretos para aplicação na construção civil.

## 1.1. JUSTIFICATIVA

A construção civil é o ramo industrial com maior geração de resíduo sólidos no mundo (ABREMA, 2024). Entretanto, tem grande potencial de absorção deles para beneficiamento de novos produtos construtivos. São vários estudos desenvolvidos nessa área produtiva já que possui baixo risco de segurança em contaminação do solo. No Brasil, existem vários estudos de incorporação de resíduos oriundos de rochas ornamentais com finalidade de seu aproveitamento e desenvolvimento de produtos novos para diferentes destinações em obras da construção civil.

## 1.2. OBJETIVOS

### 1.2.1. Objetivo Principal

O presente trabalho tem por objetivo geral estudar a influência nas propriedades físicas e mecânicas do concreto quando incorporado resíduos de marmoraria – RM, em substituição parcial da fração de areia natural, na produção de concreto para aplicação na construção civil.

### 1.2.2. Objetivos Específicos

Visando detalhar o objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Caracterizar química e mineralogicamente o resíduo de marmoraria;
- Caracterizar as propriedades físicas, mecânicas e microestruturais dos concretos com e sem adição do resíduo;
- Constatar a viabilidade técnica da incorporação do resíduo de marmoraria na produção de concreto; e
- Propor uma destinação ambientalmente correta para concreto com adição do resíduo;

## **2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1. CONCRETO: COMPOSIÇÃO E PROPRIEDADES**

O concreto é o principal material de construção resultante da mistura de aglomerante (cimento), agregados (pedra e areia) e água, sendo que o cimento ao ser hidratado pela água, forma uma pasta resistente e aderente aos agregados, formando um bloco rígido (ABCP, 2024). Constituído por aglomerante, agregado, água e aditivo, tem fundamental importância para a construção civil. Após a mistura, passa por vários processos no estado úmido, até a fase seca após hidratação das partículas. Suas propriedades são influenciadas pelas características dos materiais constituintes (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Esses elementos que constituem o concreto têm que necessariamente ter qualidade suficiente para que não ocasionem corrosão nas armaduras, nem prejudique a durabilidade do concreto (ABNT NBR 12655, 2015). Outro fator que interfere nas propriedades do concreto é a temperatura. De acordo com Neville (2016), o aumento da temperatura apressa as reações químicas de hidratação, contribuindo com as resistências iniciais do concreto, mas atrapalhando as mesmas posteriormente. Por isso, a hidratação inicial rápida aparentemente forma produtos com uma estrutura fisicamente mais pobre, mais porosa, de modo que uma pequena parte desses poros nunca será preenchida.

A relação água/cimento é crucial para evitar uma estrutura porosa que prejudique a resistência. O uso de aditivos pode melhorar a resistência e outras propriedades do concreto. Controlar esses fatores é essencial para garantir a qualidade do concreto (PETRUCCI, 2005).

Muitos cientistas de todo o mundo estão tentando melhorar as propriedades físicas e mecânicas do concreto, utilizando novos materiais diferentes, até mesmo incorporando resíduos com diferentes granulometria e composição similares.

### **2.2. APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS EM CONCRETO**

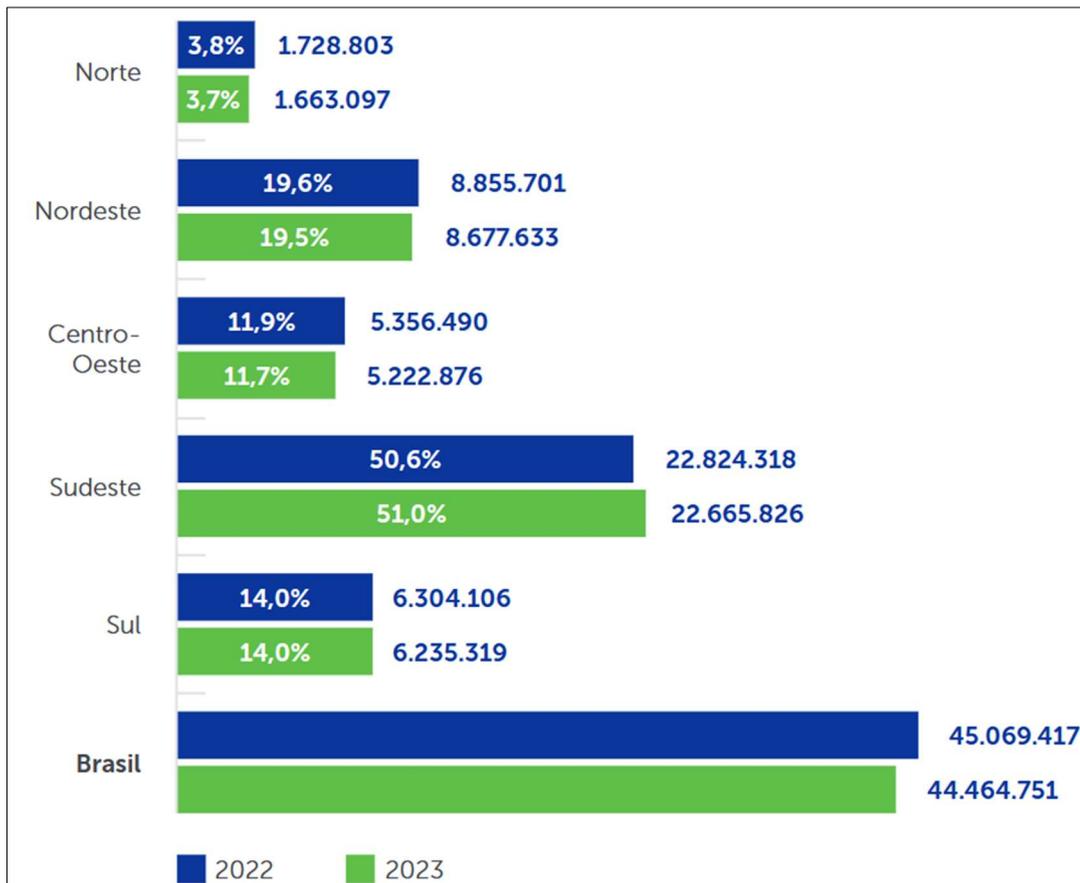
Com o crescimento da construção civil, atribuído ao desenvolvimento urbano, grandes números de edifícios antigos vêm sendo demolidos. Novas construções têm demandado maior quantidade de matérias-primas para execução. Com isso, recursos naturais são mais demandados como agregados ao concreto culminando na redução significativa da disponibilidade desses recursos “*innature*”. Com intuito de evitar escassez de matéria-prima e

contribuir com a destinação dos resíduos gerados, pesquisas têm sido desenvolvidas para aproveitamento desses resíduos sólidos.

A Associação Brasileira de Empresas do Meio Ambiente (ABREMA) publicou no PANORAMA 2024 um detalhamento mais abrangente sobre o fluxo de resíduos no Brasil, apresentando uma geração anual estimada de aproximadamente 81 milhões de toneladas de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) no ano anterior, o que equivale a mais de 221 mil toneladas de resíduos geradas todos os dias. Regionalmente, o Sudeste continua sendo o maior gerador de RSU do Brasil, em seguida a região Nordeste, Sul, Centro Oeste e Norte respectivamente.

Estima-se que aproximadamente 44 milhões de toneladas de resíduos de construção e demolição (RCD, também usado como RCC – resíduos da construção civil) tenham sido geradas no Brasil em 2023. O gráfico 1 apresenta dados comparativos entre 2022 e 2023.

Gráfico: 1 - Geração de RCD no Brasil – Comparativo 2022 e 2023 (toneladas)



Fonte: ABREMA, 2024.

No que diz respeito à sua composição, os Resíduos da Construção e Demolição (RCD) apresentam uma grande diversidade de materiais. Farias *et al.* (2024) destaca a importância da origem do resíduo, que pode ser proveniente de atividades relacionadas à construção

(construção, reformas e reparos em edificações e outras estruturas); de demolição (destruição de edificações e outras estruturas); ou ainda de procedimentos de extração de materiais para construção (rejeitos de jazidas). Estudos demonstram (CARVALHO *et al.* 2026) que o concreto produzido com materiais reciclados em sua composição preserva suas características físicas e mecânicas, atendendo aos requisitos estabelecidos nas normas técnicas, particularmente na NBR 6118 (2023). Nascimento *et al.* (2020), concluiu ao final do seu experimento com RCD, que a utilização de até 50% no teor de substituição do resíduo pelo agregado convencional não altera a qualidade nem as características mecânicas do concreto, conferindo uma eficiência mecânica satisfatória com resultados superiores ao concreto convencional. Em contrapartida, FROTTE *et al.* (2017) fez algumas correlações entre as propriedades do concreto no estado endurecido para compreender as alterações geradas pela presença do RCD no concreto e identificou que o aumento do teor de substituição de agregado natural por agregado reciclado levou a uma diminuição na trabalhabilidade, das massas específicas seca e saturada e do módulo de elasticidade do concreto, bem como a um aumento da absorção e do índice de vazios.

Resíduos da indústria mineral, oriundos de rochas ornamentais, também estão sendo pesquisados para aproveitamento em vista que a quantidade de resíduos é muito grande em relação a outros bens minerais. A lavra (extração) e o processamento das rochas ornamentais como mármore, granito, quartzito, ardósia e outras, produzem em todas as suas etapas uma quantidade expressiva de resíduos sólidos. Esta quantidade expressiva de resíduos gerados afeta o meio ambiente e à produtividade. Grande parte desses resíduos são descartados nas próprias pedreiras, causando um grande impacto ambiental visual e estético, como mostra a figura 1.

Figura 1 - Disposição inadequada dos rejeitos da lavra



Fontes: Campos *et al.* (2007)

Farias *et al.* (2022) desenvolveu pesquisa sobre resíduo proveniente da lavagem internados balões dos caminhões betoneira, das operações de limpeza do ponto de carga/descarga de concretos que retornam à Central Dosadora de Concreto, e produziu mistura de concreto com 20 e 40 % de lama residual de concreto usada como agregados miúdos reciclados. Nos resultados, observou ganhos de resistência à compressão axial de até 28 % e redução de até 62 % do índice de vazios nas misturas com 20 % de substituição do agregado miúdo natural pelo agregado miúdo reciclado, ratificando grande potencial em substituição parcial aos agregados miúdos naturais para produção de novos concretos.

Outros resíduos vêm sendo estudados para beneficiamento na construção. O aproveitamento de resíduos em pó (cinzas volantes, pó vulcânico e escória de alto-forno) e agregados reciclados influencia nas propriedades mecânicas, na permeabilidade à água e na durabilidade do concreto, possibilitando seu uso na produção de concreto permeável. O uso de resíduos em pó tem um efeito de preenchimento na estrutura interna do concreto permeável. Devido à sua reação química ser mais lenta que a do cimento, esses resíduos não contribuem para a resistência inicial, mas são benéficos para o desenvolvimento posterior da resistência, bem como para a durabilidade do concreto permeável (XIE; LI; NG, 2023).

Na Índia, a areia natural se tornou um material escasso e caro. Buscando reduzir o consumo de areia natural pesquisadores estudam materiais sustentáveis não convencionais como subprodutos industriais, onde o descarte em massa e o gerenciamento de resíduos sólidos são o problema. Rajeeth *et al.* (2021) realizou experimentos com escória de cobre, e obteve resultados positivos na resistência à compressão, resistência à abrasão e propriedades de durabilidade como resistência a ataques químicos em área de alta agressividade, quando utilizados substituição de 40 a 60% de substituição na massa. Outros resíduos, como borra de vidro, têm sido empregados como substitutos do cimento, assim como fragmentos de borracha provenientes de pneus, utilizados como agregado miúdo. Estudos também indicaram melhorias no desempenho mecânico, com um aumento de 5% na resistência à compressão, 4% na resistência à tração indireta e 5% na resistência à flexão (AKBAR *et al.*, 2023).

Resíduos de descarte oriundo da área médica e farmacêutica também têm provocado atenção crescente. A exemplo, têm-se o pó de *blister* farmacêutico desprezado após uso de medicamentos e com descarte direcionado a aterros sanitários ou despejo direto. Devido alto custo de reciclagem do resíduo, estudos da incorporação do resíduo pó de *blister* estão sendo realizados para aplicação na construção civil em substituição aos agregados finos. E resultados confirmam que a incorporação em baixo teor de substituição do agregado fino, utilizado com aditivo superplastificante elevaram a resistência mecânica em 14,87%, e a

trabalhabilidade do concreto se comparado ao concreto convencional (CHANDRASEKHAR, 2023).

O uso da tecnologia pode desenvolver medidas para aproveitamento dos resíduos gerados, e capacitação de profissionais para gerenciamento e manejo de descartes. Assim como o implemento de plano municipal de gestão pública para eficiente gerenciamento em obras podem reduzir significativamente perdas e desperdícios em canteiro de obras, vindo a impactar com questões ambientais, sociais e econômicas no setor construtivo (BARATTO *et al.*, 2023).

Segundo Nagalli (2014), a administração pública tem responsabilidade na criação de planos de gerenciamento dos resíduos da construção civil (RCC) de forma a incentivar a redução de descarte desses resíduos. Diretrizes, leis e regulamentos municipais devem ser elaborados para controle e manipulação desses resíduos nos canteiros de obras (NAGALLI, 2014).

A revisão da literatura revela que a adição de uma quantidade adequada de resíduos sólidos ou a aplicação de métodos apropriados de tratamento aos resíduos sólidos tende a melhorar os atributos de desempenho do concreto permeável (XIE; LI; NG, 2023).

### **Normatização Brasileira de Resíduos Sólidos**

A norma NBR 10004: “Resíduos sólidos – Classificação” define a classificação de resíduos de acordo com a atividade ou processo que lhe deu origem, quanto aos seus constituintes e características; e quanto a comparação desses constituintes com listagens de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente já é conhecido. Para os efeitos desta norma, os resíduos são classificados em:

- a) Resíduos classe I – Perigosos: são aqueles que, devido às suas características de inflamabilidade, toxicidade, reatividade, radioatividade, corrosão e patogenicidade em geral, representam riscos à saúde pública ou são capazes de ocasionar impactos adversos ao meio ambiente, quando manuseados ou dispostos sem os cuidados apropriados;
- b) Resíduos classe II – Não Perigosos, que por sua vez se subdividem em:
  - Resíduos classe II A - Não Inertes: são aqueles não enquadrados pela classe I ou pela II B;

– Resíduos classe II B - Inertes: são aqueles que quando submetidos a contato com água destilada ou deionizada, não tem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água.

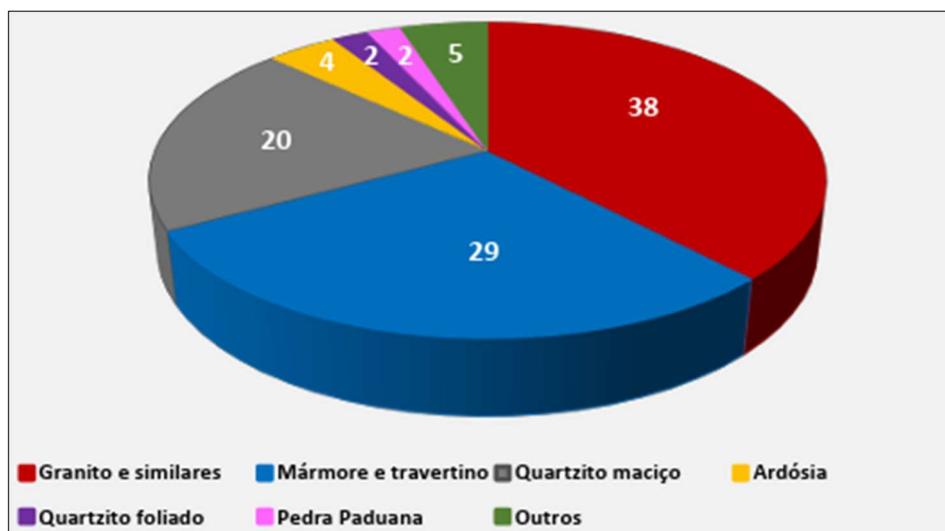
Os resíduos sólidos da construção civil se enquadram, nessa classificação, como “classe II B - não perigosos e inertes”.

Alguns resíduos sólidos podem causar impactos negativos significativos na durabilidade e resistência do concreto permeável devido às suas características e composições químicas. Portanto, é essencial realizar a escolha dos materiais residuais adequados, bem como explorar métodos de melhoria de desempenho para diferentes resíduos sólidos. Isso inclui de aprimoramento da classificação e a modificação química, entre outras técnicas, para alcançar o melhor aproveitamento possível dos resíduos sólidos.

### 2.2.1. Aproveitamento de resíduo de rochas ornamentais

Rochas ornamentais são rochas comuns utilizadas para fins diferenciados, especialmente na decoração, devido às suas propriedades físico-químicas, ampla variedade de cores e apelo estético. Os tipos mais comuns de rochas ornamentais incluem os chamados "granitos" e "mármore". O Gráfico 2 apresenta o perfil da produção brasileira por tipo de rocha em 2023.

Gráfico 2 - Perfil da produção brasileira por tipo de rocha em 2023  
(participação percentual)



Fonte: ABIROCHAS (2024)

O Brasil, reconhecido por possuir a maior geodiversidade do mundo, ocupa uma posição de destaque no mercado internacional de rochas ornamentais, sendo também referência em sustentabilidade no setor. Pesquisas avançadas realizadas globalmente têm aprimorado o uso do pó de rocha, prática conhecida como rochagem, para a remineralização e fertilização dos solos. Segundo dados fornecidos pela ABIROCHAS (2021), entre 2016 e 2019, o Brasil ocupava o quinto lugar no ranking dos principais produtores mundiais de rocha ornamental, produzindo em média 8,3Mt por ano, o que representava cerca de 5,5% da produção mundial. Em 2023, o país fechou a produção de 10,0Mt, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Distribuição da produção de rochas ornamentais e de revestimento no Brasil - 2023

Região	UF	Produção (1.000 t)	Tipo de Rocha
Sudeste	Espírito Santo	2.600	Granito e mármore
	Minas Gerais	1.900	Granito, pegmatito, ardósia, quartzito foliado, quartzito maciço, pedra-sabão, mármore
	RJ e SP	250	Granito, mármore, gnaiss (Pedra Paduana) e arenito
Nordeste	Bahia	1.900	Granito, pegmatito, mármore, travertino, quartzito maciço
	Ceará	1.300	Granito, pegmatito, calcário, mármore
	Paraíba	450	Granito e conglomerado
	PE, AL, RN e PI	750	Granito, quartzito, mármore, calcário
Sul	PR, RS e SC	500	Granito, mármore, basalto, ardósia (folhelho)
Centro-Oeste	GO, MT e MS	250	Granito, quartzito foliado, serpentinito, mármore
Norte	RO, RR, PA, TO	100	Granito, anortosito, chert, serpentinito
<b>Total Brasil</b>		<b>10.000</b>	

Fonte: ABIROCHAS (2024)

Pesquisas que avaliaram a substituição parcial do cimento por pó de mármore em diferentes proporções evidenciaram, por meio de ensaios de flexão em vigas submetidas à compressão, o surgimento de trincas conforme aumentava a quantidade do resíduo. Os resultados indicam que o pó de mármore pode ser utilizado como material alternativo em substituições de baixo percentual, pois, à medida que aumenta a proporção do resíduo, ocorre uma redução na resistência do material (RATHAN; SUNITHA, 2022).

Santos et al. (2024), investigaram o uso de resíduos de corte de granito como aditivos na produção de artefatos cerâmicos, e concluíram que a adição do resíduo pode melhorar a resistência mecânica e absorção de água sem comprometer a qualidade do produto. Os autores confirmaram a viabilidade econômica considerando custo de produção e redução de matérias primas proporcionando benefícios em termos de sustentabilidade.

O uso de resíduos de corte de granito também tem sido investigado como substituto parcial para a areia natural na produção de concreto autoadensável. Esse tipo de concreto tem a vantagem de se compactar sem a necessidade de vibração, entretanto, a substituição pode afetar a trabalhabilidade e a fluidez do concreto se não utilizado com a proporção correta, vindo a interferir negativamente no desempenho do concreto (JAIN; GUPTA; CHAUDHARY, 2019). Por sua vez, o resíduo do pó de mármore possui propriedades químicas e físicas que podem ser vantajosas para a produção de cimento e concreto, como sua composição rica em carbonato de cálcio, que pode atuar como um material pozolânico, melhorando as propriedades do concreto. Estudos sobre a substituição parcial do cimento pelo pó de mármore na produção de concreto apresentam resultados de possibilidade de melhoria na trabalhabilidade e redução de porosidade do concreto, resultando em um material mais denso e resistente (ALIABDO; ELMOATY; AUDA, 2014).

É fundamental destacar a relevância do aproveitamento dos resíduos gerados pela indústria de rochas ornamentais. O tratamento adequado desses resíduos possibilita sua reintegração ao mercado, fortalecendo a economia local. No entanto, o descarte inadequado ainda é uma realidade que compromete o meio ambiente. Assim, o aproveitamento dos resíduos de marmorarias tem contribuído para o crescimento econômico, a diminuição do consumo de recursos naturais e o aumento das oportunidades de emprego no setor.

No processo de corte dos blocos de rochas, ocorre a geração de uma quantidade significativa de resíduos finos de rocha triturada, conhecidos como resíduo. Quando misturados a aditivos, esses resíduos recebem o nome de "lama abrasiva" ou lama de beneficiamento de rochas ornamentais. Trata-se de uma mistura de partículas finas suspensas em água, que passa por etapas de decantação e secagem, permitindo que a lama resultante seja transportada e descartada de forma adequada. (CUSTODIO, GOMES, CARVEZAN, 2023).

### **2.2.2. Vantagens e desvantagens**

As rochas ornamentais são amplamente utilizadas para atender às demandas específicas de projetos na construção civil. No entanto, uma parcela significativa desse

material acaba se transformando em resíduos durante as obras, muitas vezes devido à falta de planejamento para a reutilização dos recursos descartados. A própria construção civil possui um grande potencial para aproveitar esses resíduos, já que suas estruturas podem incorporá-los em seu interior sem causar danos ao meio ambiente, contribuindo para a redução do uso de lixões e aterros sanitários.

Embora o concreto com utilização de resíduos ofereça diversas vantagens a redução de custos, diminuição da extração de recursos naturais atendendo a fatores ambientais, também apresenta algumas desvantagens que devem ser consideradas ao decidir sua aplicação em projetos de construção. Piramidal (2020), exemplificou algumas desvantagens conforme critério relacionados abaixo:

- ✓ Variação nas propriedades: O concreto pode ter propriedades variáveis devido à natureza onde as jazidas estão situadas, e quanto ao processo de manuseio e corte. Isso pode resultar em variações na resistência, durabilidade e outras características, exigindo um controle de qualidade rigoroso.
- ✓ Possíveis contaminantes: Os resíduos podem conter contaminantes indesejados, como materiais orgânicos, argila, gesso e outros detritos. A presença desses contaminantes pode afetar negativamente as propriedades do concreto.
- ✓ Maior controle tecnológico: Em algumas aplicações que requerem concretos de alta resistência, pode ser desafiador atingir níveis comparáveis de resistência com o concreto com incorporação do resíduo.
- ✓ Tempo de preparo do agregado para uso: O preparo do resíduo para utilização envolve processamento adequado de triagem, limpeza, secagem, peneiramento, o que pode resultar em disponibilidade de maior tempo em comparação com o concreto convencional.
- ✓ Aceitação no Mercado: Ainda pode haver resistência em relação ao uso do concreto com incorporação do resíduo beneficiado, seja devido à falta de conhecimento, regulamentações desatualizadas ou preconceitos.

Cabe ressaltar que muitas dessas desvantagens podem ser mitigadas com avanços contínuos na tecnologia, novas pesquisas desenvolvidas e práticas de gestão eficazes.

### 2.3. SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL

O aumento do crescimento populacional e conseqüentemente desenvolvimento industrial aumentaram a produção no setor construtivo, resultando no aumento da geração de resíduos.

O setor da Construção Civil desempenha um papel fundamental no contexto da sustentabilidade, abrangendo aspectos ambientais, econômicos e sociais. No entanto, o consumo de recursos naturais e o descarte inadequado de resíduos sólidos resultam em impactos ambientais significativos, sendo que mais da metade desses resíduos tem origem nas atividades de construção.

A política dos *3 R's da sustentabilidade* (reduzir, reutilizar e reciclar) vem a ser um “conjunto de práticas cujo objetivo é minimizar o impacto ambiental causado pelo desperdício de materiais e produtos provenientes de recursos naturais”. Desta forma, reduzir a utilização de recursos, reutilizar produtos e materiais e reciclar aqueles que tiverem chegado ao fim de sua vida útil (PIRAMIDAL, 2020).

O crescimento econômico da indústria da construção civil pode ser alcançado de maneira sustentável, desde que haja um planejamento adequado e que a sustentabilidade seja uma meta compartilhada por todos os envolvidos no processo. Métodos e tecnologias estão sendo aplicadas para o melhor aproveitamento de energia e águas pluviais como medida sustentável. O efeito de técnicas sustentáveis aplicadas na construção civil como telhados verdes, uso de energia solar, e gestão e gerenciamento de resíduos na construção civil traz benefícios ambientais e redução de custos dos empreendimentos (ROQUE e PIERRE, 2019).

Nascimento *et al.* (2022), realizou uma pesquisa acerca de métodos e tecnologias que podem ser aplicados na fase de projeto de paginação, no canteiro de obras e no descarte dos resíduos oriundos de construção civil, e constatou que é possível reduzir a geração de resíduo durante a construção, e a separação e destinação de resíduos para reutilização, garantindo a sustentabilidade no processo.

No contexto atual, em que a indústria da construção civil ainda apresenta elevado desperdício de recursos como água, energia e materiais, a adoção de tecnologias surge como uma solução para aprimorar o desempenho e a competitividade do setor, além de colaborar com o alcance das metas de desenvolvimento sustentável.

A inserção das Tecnologias da Indústria 4.0 na construção civil permitiu o uso de tecnologias como sensores, robôs, sistemas de modelagem e simulação, inteligência e drones

para que tenham sua produtividade, eficiência, segurança, estratégia e gestão aprimorada do meio ambiente (DE ALMEIDA *et. al*, 2022).

Em pesquisa acerca da responsabilidade socio ambiental corporativa em empresas do setor de construção civil atuantes no Estados Unidos, México e Brasil, constatou-se que os países apresentam diferenças nas práticas realizadas. Os Estados Unidos desenvolvem mais práticas voltadas para o efeito da construção sobre os impactos ambientais, com vista a mitigá-los, enquanto no México conta com técnicas aplicadas em projetos e com o governo mais participativo. Já o Brasil, destaca-se pela diversidade de práticas tanto na produção quanto na busca pela redução e aproveitamento dos resíduos gerados, porém necessita de técnicas mais simples como já adotadas pelos outros países, entendendo que a sustentabilidade não é apenas ambiental, é também técnica e econômica (GARCIA; PEREIRA; DA SILVA, 2023)

Espera-se com o crescimento econômico e desenvolvimento da indústria da construção civil que a sustentabilidade seja uma meta compartilhada por todos os envolvidos no processo.

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

São vários resíduos gerados a partir da produção industrial, que estão sendo investigados para aproveitamento concomitantemente com material ligante, de baixo teor de finura, com a finalidade de redução de porosidade do concreto, conseqüentemente maior trabalhabilidade e aumento na resistência mecânica. Porém são vários os fatores que devem ser controlados a fim de se obter melhores resultados nos ensaios mecânicos. Para isso, deve-se atentar para as características dos materiais selecionados, e dosagem adequada dos materiais a serem utilizados.

Nesta pesquisa foram estudados diferentes traços de concreto com diferentes percentuais de resíduo de marmoraria substituindo a areia natural, com o objetivo de avaliar o comportamento do material e sua interferência nas propriedades mecânicas do concreto.

#### **3.1. MATERIAIS**

Neste capítulo serão descritos os materiais e métodos utilizados para a realização da pesquisa.

### 3.1.1. Aglomerante

Foi utilizado o cimento do tipo Portland de Alta Resistência Inicial - CP V ARI RS, com resistência à compressão mínima de 34 MPa (aos 07 dias), fabricado na cidade de Pacatuba/SE, pela empresa Polimix Concreto Ltda.

### 3.1.2. Agregado miúdo

Foram utilizados agregados miúdo convencional: areia natural e o resíduo de marmoraria, ambos provenientes do estado da Bahia.

#### 3.1.2.1. Areia natural

Utilizou-se areia natural adquirida em loja comercial localizada na região metropolitana de Camaçari-BA, classificada como areia do tipo quartzosa e enquadrada como agregado miúdo, conforme os limites estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2009).

#### 3.1.2.2. Resíduo de marmoraria

O resíduo proveniente de rochas ornamentais, foi coletado em forma de lama abrasiva secas a temperatura ambiente, fornecido por empresa fornecedora de mármore e granitos, localizada na cidade de Salvador/BA, de acordo com a ilustração na Figura 2.

Figura 2 – Lama abrasiva no tanque de decantação antes da coleta para beneficiamento



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Após a coleta, as amostras foram identificadas e levada ao Laboratório de Solos, do IFBA – campus Salvador, onde foram submetidas ao processo de secagem em estufa elétrica, da marca Marconi, modelo MA035/1, à temperatura 110°C pelo período de 24 horas. (Fig. 3).

Figura 3– Estufa utilizada para secagem do RM



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Após estarem secas, as amostras foram reduzidas de tamanho manualmente, com auxílio de peneiras convencionais, no Laboratório de Solos, do IFBA - campus Salvador. A amostra do resíduo de marmoraria não precisou passar pelo processo de moagem, por se apresentar como um pó bastante fino. Na sequência, as matérias primas passaram pelo peneiramento a seco, usando-se a peneira de 270 mesh (abertura de 0,053mm) para o RM.

De acordo com a norma 7211:2009, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), agregado para concreto deve ser “composto por grãos de minerais duros, compactos, duráveis, estáveis, limpos e que não interfiram no endurecimento e hidratação do cimento e também na proteção contra corrosão da armadura”.

### 3.1.3. Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado foi a brita granítica com dimensão nominal de #9,5 (passante na peneira de 0,95mm), proveniente de rochas calcárias, popularmente conhecida como brita 0 (zero) ou pedrisco. Sua granulometria atende aos limites especificados pela NBR 7211 (ABNT, 2019). O material foi obtido junto a pedreira Valéria, na capital de Salvador/BA.

### 3.1.4. Água

Segundo Metha e Monteiro (2008), a água é essencial para a produção do concreto, sendo responsável pela cura(endurecimento), que é a técnica que visa a hidratação do concreto, para evitar a evaporação prematura da água na estrutura concretada. O elemento pode chegar a 1/5 do volume do concreto, é fundamental que a água utilizada para confecção do concreto siga as especificações normatizada.

A água utilizada para a produção do concreto e para o processo de cura (hidratação) dos corpos de prova foi proveniente da rede pública de abastecimento, administrada pela Empresa Baiana de Águas e Saneamento S.A (Embasa), destinada ao consumo humano, na capital de Salvador/BA.

### 3.1.5. Aditivo

Foi empregado um aditivo líquido multifuncional, com propriedades plastificantes e aceleradoras, especialmente formulado para concreto seco. O produto utilizado foi o Bloco e Paver X - Aditivo Plastificante e Acelerador Wobrax.

Com a conclusão da preparação, foram iniciadas as análises para caracterização das matérias primas. Os materiais são apresentados na Figura 4.

Figura 4 - Componentes utilizados na produção do concreto



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

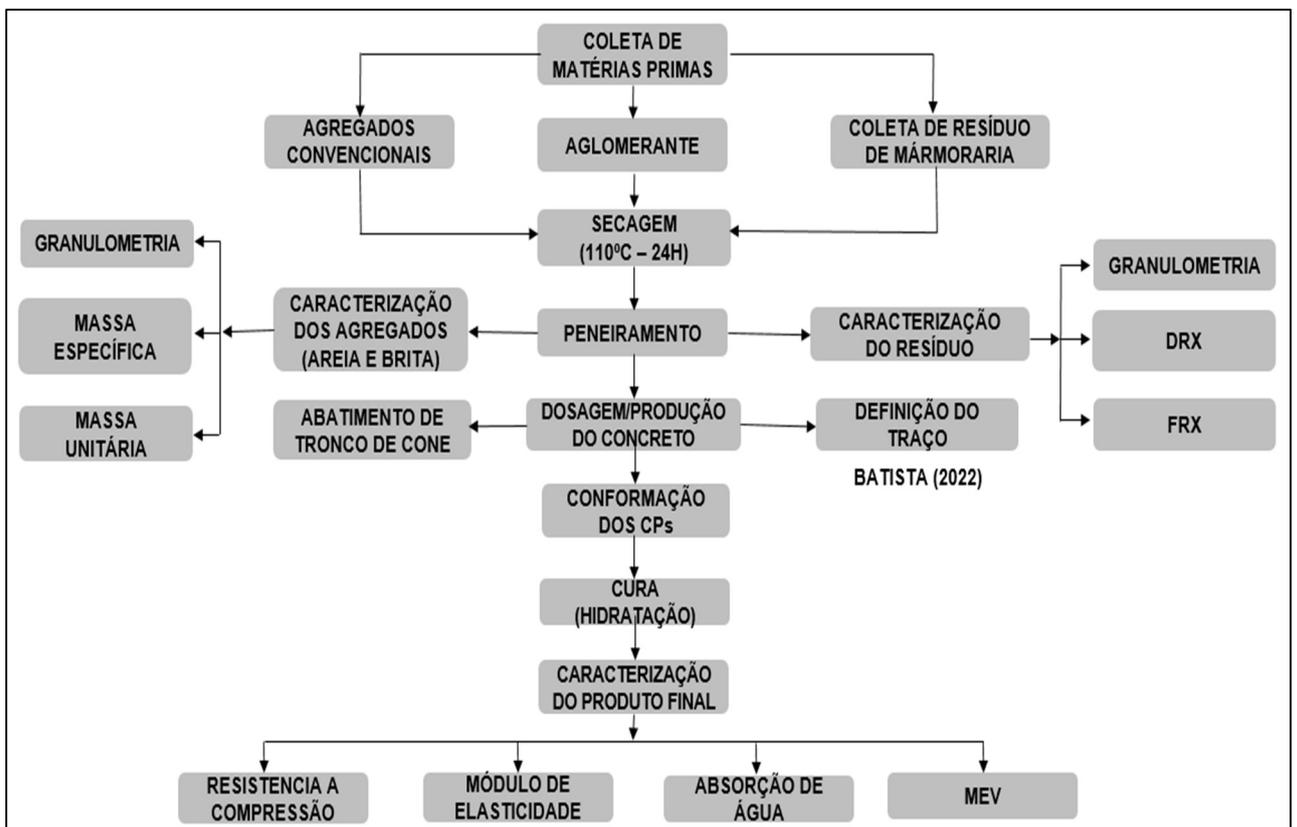
### 3.2. MÉTODOS

A obtenção de dados é essencial para estabelecer padrões comparativos entre os agregados e para o controle da produção dos concretos. Por este motivo, foram realizados ensaios de massa específica, massa unitária e granulometria (determinando-se a dimensão máxima característica do agregado, módulo de finura e classificação do agregado) e teor de absorção de água (apenas para agregados graúdos). Para a caracterização, foram feitas duas repetições de uma amostra de material e, com base nos resultados obtidos, foi calculada a média, que foi adotada como o valor real. Em resumo, as análises e considerações foram baseadas nesses valores médios.

No que se relaciona ao processo detalhado, tomado como base para a realização dos ensaios, considere-se a sequência das atividades realizadas na seleção e caracterização dos materiais: obtenção, coleta e preparação das amostras para a caracterização física e química dos agregados miúdos (areia natural e resíduo de marmoraria) e a caracterização física do agregado graúdo (brita 0); dosagem e preparação do concreto; processo de hidratação e caracterização do concreto a partir dos ensaios mecânicos e análises microestruturais.

Nessa sequência, apresenta-se a figura 5, que dispõe o fluxograma da metodologia do estudo.

Figura 5- Fluxograma da Metodologia



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

### 3.2.1. Caracterização do Aglomerante

Optou-se por um cimento CP-V ARI tendo em vista possuir resistência inicial superior aos cimentos comuns, e maior durabilidade em pisos e pavimentos de concreto.

Não foram realizados ensaios para caracterização do cimento tendo em vista não ter influência para a pesquisa, já que não houve variação deste material. Porém, foi observada a análise física e química do cimento a partir dos dados fornecidos pelo fabricante.

### 3.2.2. Caracterização dos Agregados

Os materiais utilizados na pesquisa foram coletados e armazenados no laboratório de Mecânica do Instituto Federal da Bahia Campus Salvador, para serem utilizados ao longo da pesquisa, conforme avanço de cada etapa. A amostragem de agregados e a preparação das amostras para ensaios de laboratório foram realizadas conforme as normas NBR NM 26 (ABNT, 2009) e NBR NM 27 (ABNT, 2000).

A caracterização dos agregados foi dividida da seguinte forma: agregados miúdos utilizados na pesquisa, areia natural, e resíduo de marmoraria (RM); e agregado graúdo, a brita 0.

Na caracterização dos agregados miúdos, foram realizados os ensaios de caracterização física, descritos na Tabela 2, acompanhados das respectivas normas consultadas:

Tabela 2 –Caracterização física dos agregados miúdos

<b>Caracterização física dos agregados miúdo</b>	
<b>Ensaio</b>	<b>Norma</b>
Granulometria: módulo de finura e dimensão máxima	NBR NM 248/2003
Massa unitária	NBR NM 45/2006
Absorção de água	NBR NM 30/2001
Massa específica	NBR NM 53/2003

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

### 3.2.2.1. Análise mineralógica por difração de raios X (DRX)

A composição mineralógica da amostra de RM, foi obtida através do ensaio de difração de raios X, realizado no difratômetro, marca Shimadzu, modelo XRD 7000, do Laboratório de Caracterização de Materiais, da UFBA, conforme Figura 6.

Foram utilizados como parâmetros para esta análise, uma tensão de 30KV, uma intensidade de corrente de 20mA, uma faixa de ângulo de varredura de 5° a 80° e uma velocidade de varredura de 2°/min, utilizando-se a radiação do Cu.

Para realizar a análise qualitativa de cada matéria prima e se identificar as fases presentes, foi feita a comparação entre os difratogramas gerados e as cartas padrões do *International Center for Diffraction Data* (ICDD) utilizando-se o software *X'PertHighScore Plus*.

Figura 6– Difratômetro de Raio-x utilizado para análise mineralógica



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

### 3.2.2.2. Análise química por fluorescência de raios X (FRX)

A caracterização química da amostra, foi determinada através do método semiquantitativo de fluorescência de raios X, por meio de um espectrômetro de energia dispersiva, da marca Bruker, modelo S2 Ranger, do Laboratório de Caracterização de Materiais, da UFBA, através do qual se obteve os elementos químicos constituintes do resíduo, de acordo Figura 7.

Para a realização desse ensaio, foi necessária a preparação prévia de pastilhas de cada amostra, utilizando-se aproximadamente 10g do resíduo de marmoraria, um molde de aço

com 38mm de diâmetro e uma prensa hidráulica da marca Somar, com capacidade de 15t, do Laboratório de Moagem de Alta Energia, da UFBA.

Figura 7– Espectrômetro de Raio-x utilizado para análise de composição qu.



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

### 3.2.2.3. Granulometria

A análise granulométrica dos agregados é de grande importância para caracterização física dos agregados, para determinar a distribuição de tamanhos dos grãos. As amostras preparadas foram colocadas em estufa para secagem ( $110\pm 5^{\circ}\text{C}$ ). Após secas, foi feita a limpeza para retirada das impurezas.

Em seguida, foram colocadas em peneiras e agitada por meio aparelhos mecânicos até que todo o material passasse pela malha de 19 mm, 12,5 mm, 9,5 mm, 6,3 mm, 4,75 mm, 2,36 mm, 1,18 mm, 0,60 mm, 0,30 mm e 0,15 mm.

Figura 8 – Aparelho mecânico utilizado para o ensaio de granulometria



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

### 3.2.2.4. Massa específica

Foi realizado ensaio para identificação da massa unitária e massa específica. Esta análise da massa unitária do agregado é fundamental, pois serve como referência para converter massa em volume ou vice-versa (NEVILLE, 2016).

### 3.2.2.5. Massa unitária

Já para a caracterização física do agregado graúdo (brita 0), foram realizados os ensaios especificados na Tabela 3, bem como as normas consultadas.

Para o agregado miúdo a ser incorporado, RM, foi realizada a caracterização química e mineralógica do pó, através das seguintes análises: análise química por Fluorescência de Raios X (FRX), e a Difração de Raios X (DRX).

Tabela 3–Caracterização física do agregado graúdo

Caracterização física dos agregados graúdos	
Ensaio	Norma
Granulometria: módulo de finura e dimensão máxima	NBR NM 248/2003
Massa unitária	NBR NM 45/2006
Absorção de água	NBR NM 30/2001
Massa específica	NBR NM 53/2003

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

### 3.2.3. Caracterização do Aditivo

O aditivo utilizado é indicado para a fabricação de blocos, pavers, peças pré-moldadas e outros artefatos de cimento, com o objetivo de melhorar a trabalhabilidade do concreto. Compatível com a maioria dos tipos de cimento, não apresenta restrições específicas quanto à sua aplicação.

Não foram realizados ensaios para caracterização do cimento tendo em vista não ter influência para a pesquisa, já que não houve variação deste material.

### 3.2.4. Produção do concreto

#### 3.2.4.1. Definição do Traço de Referência

Após analisar estudos de traços realizados em experimentos por outros autores, com resultados de ensaios de resistência características acima de 30 Mpa aos 28 dias, foi proposto utilizar traço comumente adotado na fabricação de blocos de concreto. Em sua pesquisa,

Batista (2020) realizou experimentos em laboratório, utilizando diferentes traços com variação de proporção de agregados e relação água cimento com finalidade em obter resistência maior que 35 MPa e menor consumo de cimento, fazendo uso dos mesmos materiais a serem empregados neste estudo. Tendo em vista os bons resultados por Batista (2022), optou-se por manter o mesmo traço de referência (T0) sendo 1:4:0,45 (cimento; agregados: relação água cimento). Os aglomerantes empregados pelos autores foi o cimento CP V-ARI, mesmo utilizado neste trabalho. Tendo definido o traço de referência, foram estabelecidas três variações, denominados traços experimentais. Os traços experimentais 0, 1, 2 e 3 respectivamente T10, T120, T30 consistem em alterações do chamado traço de referência (T0), através da substituição parcial da areia natural pelo resíduo de marmoraria nas proporções de 10%, 20% e 30%, respectivamente. Os traços de dosagem são explicitados na tabela 4.

Tabela 4 – Traços em volume dos concretos produzidos.

<b>Materiais</b>	<b>Traço de Referência (T0)</b>	<b>Traço Experimental (T10)</b>	<b>Traço Experimental (T20)</b>	<b>Traço Experimental (T30)</b>
Cimento	1,000	1,000	1,000	1,000
Areia	2,000	0,800	0,600	0,400
RM	0,000	0,200	0,400	0,600
Brita 0	2,000	2,000	2,000	2,000
Relação A/C	0,450	0,450	0,450	0,450

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

### 3.2.4.2. Moldagem dos Corpos de Prova

Após a definição do traço, foi iniciado o procedimento para produção do concreto especificamente de forma manual. Primeiramente, os materiais foram separados e devidamente identificados; em seguida, os utensílios e ferramentas a serem utilizadas na produção foram umedecidos para que não houvesse perda de água do traço; logo depois, os agregados (miúdo e graúdo) foram misturados na condição saturada com superfície seca e acrescido do aglomerante (cimento) até que a mistura se tornasse homogênea; a água foi adicionada aos poucos, tendo sua quarta parte separada para diluição do aditivo químico ao final da mistura. Todo o processo foi executado manualmente no carrinho de mão com capacidade de 60 litros. Segue na Figura 9 a mistura pronta.

Figura 9 – Mistura pronta (concreto).



Fonte: elaborado pela autora (2025)

Os corpos de prova foram moldados em fôrmas cilíndricas de material em aço zincado, com dimensões de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. Para cada um dos traços, foram moldados 15 corpos de prova (CP's) manualmente, de acordo com a NBR 5738 da ABNT (2015) - Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. No total, foram moldados 60 CP's. A Figura 10 apresenta as formas cilíndricas utilizadas na moldagem.

Figura 10 - Fôrmas cilíndrica utilizada nas moldagens.



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Após concluída a mistura, o concreto foi colocado nos moldes (devidamente limpos e untados com desmoldante) e adensados manualmente conforme a NBR 5738 – Concreto –

Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. No procedimento, foram deferidos golpes nas laterais com um martelo de borracha para realização do adensamento, em substituição a mesa vibratória. Em seguida, foi realizado acabamento da face superior, conforme ilustrado na Figura 11.

Figura 11 – Material moldado nas fôrmas cilíndricas.



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

#### 3.2.4.3. Processo de Hidratação

Para o processo de hidratação do concreto, as fôrmas foram cobertas por lonas plásticas (Figura 12) durante 24h. Após este período, as peças foram desmoldadas e submetidas à cura por imersão em água em tanque durante 7 dias para realização do ensaio de resistência a compressão e absorção de água, como mostra a Figura 13.

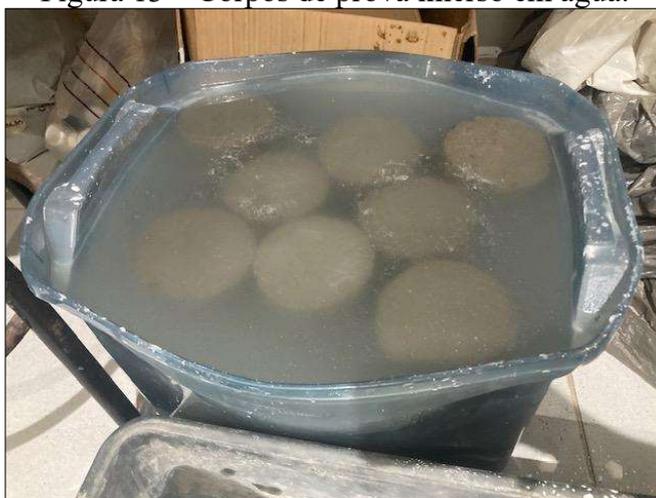
Figura 12 – Corpos de prova cobertas por lona plástica.



Fonte: elaborado pela autora (2025)

A temperatura durante a hidratação do cimento está intimamente ligada ao tempo de pega, um processo exotérmico que libera calor enquanto ocorre. Portanto, a liberação de calor indica que a hidratação está em andamento e a pega está se estabelecendo. O tempo de endurecimento é crucial para determinar o período de trabalhabilidade, sendo essencial entender a contribuição de cada composto presente (Frazão, 2021).

Figura 13 – Corpos de prova imerso em água.



Fonte: elaborado pela autora (2025)

Concluído o processo de hidratação de 7 dias em cura úmida (Figura 14), os corpos de prova foram retirados da água e pesados saturados com superfície seca.

Figura 14 – Corpos de prova desmoldados, após processo de Hidratação.



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Não foi necessário executar regularização superficial por capeamento ou retificação de superfície. Durante a fase de moldagem, o acabamento superficial foi realizado e feito verificação com auxílio de um nível.

### 3.2.5. Caracterização do Concreto fresco

#### 3.2.5.1. Determinação da consistência

A consistência foi determinada com base na NBR ABNT 16889 (2020) - Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone, um ensaio amplamente utilizado em canteiros de obras e eficaz na identificação de variações na uniformidade de misturas com proporções definidas. Para este estudo, o abatimento não foi fixado uma variável controlada, tendo em vista que a aplicação do concreto será sugerida ao final do experimento, devido processo de execução. A Figura 15 apresenta o molde de metal utilizado para realização do ensaio. Além do molde e da placa de base, também foram utilizados a haste de adensamento em aço cilíndrica com 16mm, concha metálica de seção “U” e régua com comprimento de 30 cm conforme descrito na norma brasileira.

Figura 15 – Molde I utilizado no ensaio de consistência.



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

### 3.2.6. Caracterização do Concreto endurecido

#### 3.2.6.1. Resistência a compressão axial

No controle de qualidade do concreto, geralmente especifica-se a resistência mecânica, pois essa propriedade possui um método de ensaio relativamente simples e está associada a outras características do material (MEHTA, MONTEIRO, 2008).

No requisito de resistência, a ABNT NBR 5739 (2018) não exige resistência a compressão específica tendo em vista que a norma não estipula a aplicação do concreto

confeccionado. A partir dos resultados encontrados ao final do ensaio, será analisado valores encontrados e proposto a aplicação do concreto desenvolvido conforme apontamento das normas regulamentadoras. O ensaio de resistência consiste em acoplar duas placas auxiliares de dimensão  $90\pm 5\text{mm}$  na prensa de laboratório de modo que fiquem alinhadas e então posicionar a peça centralizada nestas placas. Inicia-se então o carregamento continuamente até a ruptura completa por compressão Figura 16.

Figura 16 – Prensa universal utilizada no ensaio de resistência a compressão.



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

A resistência à compressão foi calculada de acordo com a Equação 1.

$$f_c = \frac{4F}{\pi D^2} \quad (1)$$

Onde:

$f_c$  é a resistência à compressão, em MPa;

$F$  é a máxima força alcançada, em Newtons;

$D$  é o diâmetro do corpo de prova, em milímetros.

Como os corpos de prova possuem relação  $h/d$  igual a 2, não foi necessário fazer a correção da força  $F$  utilizando fator de correção indicado na norma ABNT NBR 5739 (2018).

### 3.2.6.2. Módulo de Elasticidade

O módulo estático de elasticidade indica a rigidez do concreto no estado endurecido, que está relacionada com a hidratação do cimento presente, com travamento entre as

partículas dos agregados, devido à forma e às rugosidades dos grãos, e pelo teor de material pulverulento. Portanto, no estado endurecido, a presença de substâncias deletérias pode afetar as reações de hidratação do cimento ou afetar a durabilidade do concreto (NEVILLE, 2016).

Uma das características que afetam o módulo de elasticidade do concreto é a porosidade, influenciada diretamente pela relação água/cimento, o conteúdo de ar, a quantidade de minerais adicionados e o grau de hidratação do cimento. O tipo e a qualidade dos agregados também são fundamentais para o desenvolvimento dessas propriedades do concreto. Agregados com características adequadas e boas propriedades mecânicas contribuem para um concreto com melhor comportamento estrutural, principalmente no que diz respeito à sua rigidez e à capacidade de deformação sob carga do concreto (SILVA, FERREIRA, SOUZA; 2020).

Neste trabalho, o módulo de elasticidade foi determinado experimentalmente por meio do ensaio normalizado de compressão uniaxial simples, que avalia a relação tensão-deformação em corpos de prova cilíndricos de concreto.

### 3.2.6.3. Teor de Absorção de Água

Conforme a norma NBR 9778 (ABNT, 2005), a absorção de água, apresentada em forma percentual, refere-se ao processo no qual a água é transportada e ocupa os poros permeáveis presentes em um material sólido.

De acordo com os procedimentos recomendados pela norma, inicialmente, os corpos de prova foram levados a estufa e mantidos a temperatura  $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$  por 72 horas. Em seguida, foram retirados da estufa e pesados individualmente. Logo após a pesagem, os corpos de prova foram imersos em água à temperatura de  $(23 \pm 5) ^\circ\text{C}$  por mais 72 horas. Em seguida, retirou-se a água superficial do corpo de prova com um pano úmido e realizou-se nova pesagem individualmente.

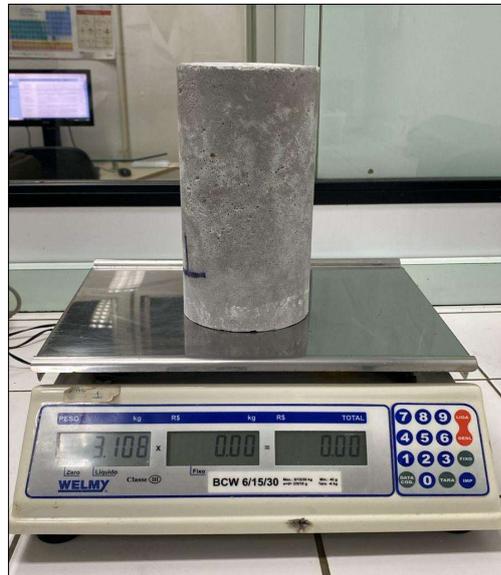
Na Figura 17, 18 e 19 apresentam-se registros fotográficos das etapas de realização do ensaio de absorção de água dos corpos de prova, que foi realizado no Laboratório de Civil do Instituto Federal da Bahia - Campus Salvador.

Figura 17 – Secagem dos corpos de prova na estufa por 72 horas.



Fonte: elaborado pela autora (2025)

Figura 18 – Coleta da massa do corpo de prova em balança digital.



Fonte: elaborado pela autora (2025)

Figura 19 – Corpos de prova submerso para absorção de água.



Fonte: elaborado pela autora (2025)

Com dados coletados, foi determinado percentual de absorção de água, a partir do cálculo da absorção (A), em porcentagem, pela seguinte expressão, equação 2:

$$A = \frac{M_{\text{sat}} - M_{\text{s}}}{M_{\text{s}}} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

$M_{\text{sat}}$  = massa do corpo de prova saturado, em gramas.

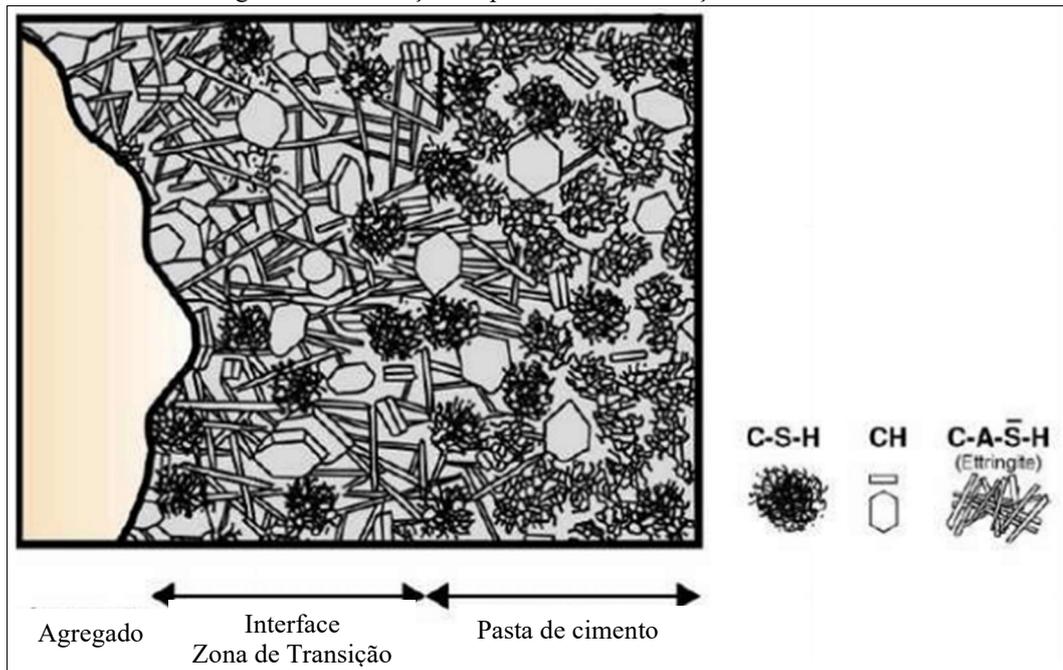
$M_{\text{s}}$  = massa do corpo de prova seco, em gramas.

#### 3.2.6.4. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A microscopia eletrônica de varredura (MEV), fornece informações sobre a morfologia da amostra. Uma das características importante do MEV é a aparência tridimensional da imagem das amostras, resultado direto da grande profundidade de campo, permitido também, o exame em pequenos aumentos e com grande profundidade de foco, o que é extremamente útil, pois a imagem eletrônica complementa a informação dada pela imagem óptica obtida (DEDAVID, 2007).

A estrutura do concreto é diversa e complexa, consistindo em três fases principais: a fase de agregado, a fase ligante, que é composta por uma massa contínua de pasta endurecida, e uma terceira fase conhecida como a zona de transição, que representa a região interfacial entre as partículas de agregado e a pasta. Segundo Silva & Liborio (2010), a eficácia do ensaio depende diretamente do tipo e da qualidade da preparação da amostra. Em técnicas de análise microestrutural, a preparação adequada desempenha um papel crucial, pois métodos apropriados facilitam tanto o exame quanto a interpretação das características microestruturais. A figura 20 ilustra a reação dos compostos na zona de transição da matriz e agregados do concreto.

Figura 20 – Ilustração do processo de hidratação do concreto

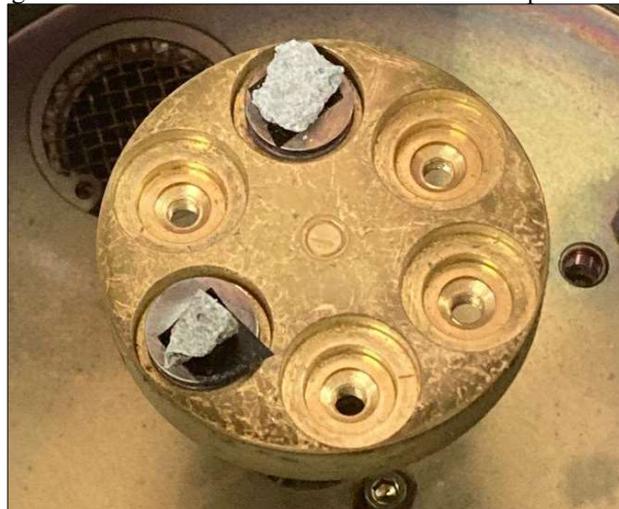


Fonte: Mehta & Monteiro, 2008.

As amostras para os ensaios do MEV foram obtidas após a realização do ensaio mecânico de compressão, coletando-se fragmentos de concreto retirados da parte central dos corpos de prova.

Para realização do ensaio, as amostras foram metalizadas com ouro em um metalizador da marca QUORUM, modelo Q150R ES, vácuo para se tornarem condutoras e puderem ser observadas pelo MEV. O recobrimento é mostrado na Figura 20.

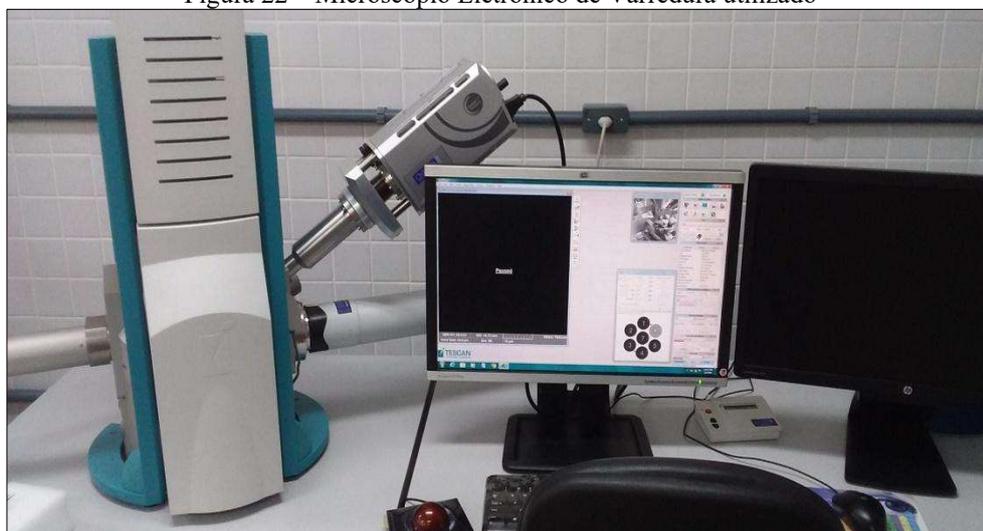
Figura 21 – Processo de recobrimento de amostra para MEV.



Fonte: elaborado pela autora (2025)

Após serem metalizadas, as amostras foram analisadas em um microscópio da marca TESCAN, modelo Vega 3LMU, do laboratório de Caracterização de Materiais, do IFBA - campus Salvador, conforme Figura 21.

Figura 22 – Microscópio Eletrônico de Varredura utilizado



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

No Capítulo 4 a seguir serão analisados todos os resultados obtidos nos ensaios realizados, e apresentados neste capítulo.

## 4. RESULTADOS

Este item aborda e analisa os resultados obtidos ao longo de todo o estudo realizado, abrangendo desde a caracterização dos materiais empregados até os ensaios mecânicos e microestruturais do concreto desenvolvido.

### Caracterização dos materiais

Inicialmente foram analisadas as caracterizações de todos os materiais utilizados nesta pesquisa. Em seguida, os dados organizados e as análises divididas em agregados miúdos (convencional e resíduo) e posteriormente agregado graúdo.

#### 4.1. Aglomerante

Foi utilizado cimento Portland de Alta Resistência Inicial (ARI) constituído, basicamente, de clínquer, gesso e material carbonático finamente moídos, e classificado como

Resistente a Sulfatos (RS) por atender aos requisitos químicos, físicos e mecânicos estabelecidos na ABNT NBR 16697/2018. Segue representado abaixo na Tabela 5, dados da análise física e química caracterizados e fornecidos pelo fabricante:

Tabela 5– Caracterização física e química do aglomerante.

Caracterização física e química do cimento	
Análise física	<ul style="list-style-type: none"> <li>– estado físico = sólido, cinza, sem cheiro;</li> <li>– massa específica = 3,11 g/cm<sup>3</sup>;</li> <li>– blaine = 4.170,16 cm<sup>2</sup>/g;</li> <li>– finura (resíduo na peneira #200) = 0,05%;</li> <li>– finura (resíduo na peneira #325) = 1,47%;</li> <li>– tempo de Início de Pega = 185,65 minutos;</li> <li>– tempo de Fim de Pega = 237,77 minutos;</li> <li>– expansibilidade a quente = 0,93 mm;</li> <li>– consistência normal = 30,26%;</li> </ul> <p style="text-align: right;">1 Dia = 18,82 MPa;</p> <p>– resistência à compressão para as seguintes idades:      3 Dias = 32,14 MPa;</p> <p style="text-align: right;">7 Dias = 37,33 MPa;</p> <p style="text-align: right;">28 Dias = 44,91 MPa.</p>
Análise química	<ul style="list-style-type: none"> <li>– resíduo insolúvel = 2,05%;</li> <li>– pH = 13;</li> <li>– perda ao fogo = 4,61%;</li> <li>– dióxido de silício, SiO<sub>2</sub> = 25,79%;</li> <li>– cal livre = 1,69%;</li> <li>– óxido de magnésio, MgO = 2,76 %;</li> <li>– trióxido de enxofre, SO<sub>3</sub> = 3,21%</li> </ul>

Fonte: Dados fornecido pelo fabricante (2024)

Para o cimento CPV-ARI e o aditivo químico à base de éter-policarboxilato utilizado na fabricação do concreto, não foram caracterizados, pois estas medidas não seriam relevantes para o estudo.

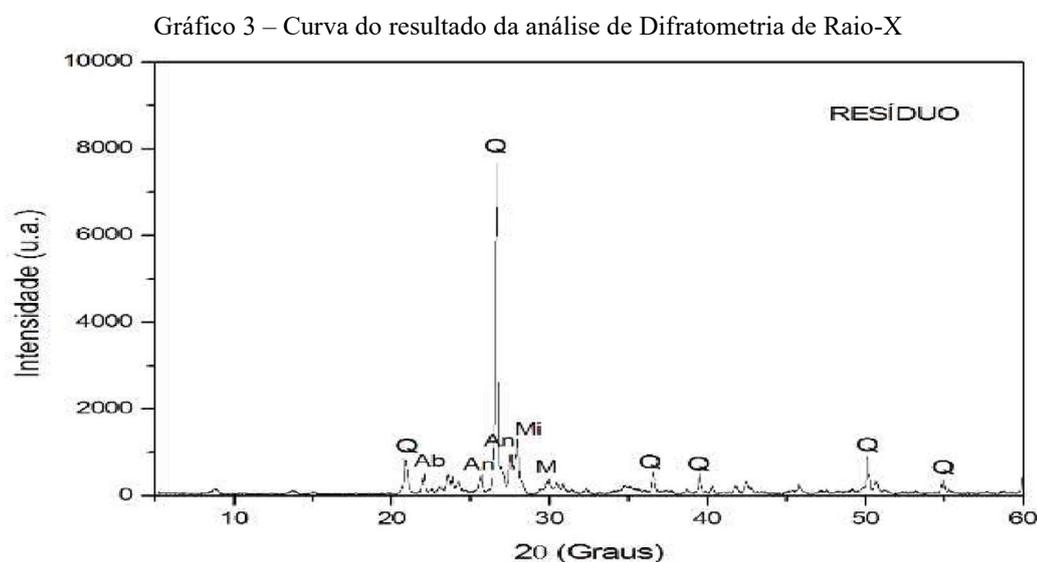
#### 4.2. Agregado miúdo

Os agregados miúdos desempenham um papel fundamental neste estudo, uma vez que a pesquisa foi conduzida com foco na substituição de materiais convencionais por alternativas, como resíduos provenientes da mineração. Essa abordagem envolveu práticas de estudo e aplicações específicas. Por este motivo, é importante destacar que os materiais alternativos mencionados ainda estão em fase de análise científica para validação de sua aplicabilidade. Por isso, essa investigação é essencial para compreender e avaliar o comportamento desses materiais quando empregados em misturas cimentícias, como o concreto.

## Análise mineralógica por DRX

Os minerais contidos no RM utilizado, foi identificado através da comparação do difratogramas de raios X, obtidos no ensaio, com as cartas padrões cadastrados no International Center for Diffraction Data (ICDD).

Na análise mineralógica por difração de raios X do RM, Figura X, pode-se observar a presença dos picos característicos de quartzo [SiO<sub>2</sub>], que se justifica pela presença da sílica em forma de quartzo, com alta cristalinidade, seguido da Caulinita [Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub>], face a maior concentração de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> na análise química, e Mica [KA<sub>2</sub>Si<sub>3</sub>AlO<sub>10</sub>(OH,F)<sub>2</sub>], justificadas pela presença dos óxidos de potássio, magnésio e ferro, respectivamente.



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

O DRX do resíduo de marmoraria, conforme ilustrado na Figura x, mostra que as fases predominantes são sílica em forma de quartzo. A formação de fases vítreas ricas em sílica gera uma viscosidade mais elevada, o que teoricamente vai favorecer a trabalhabilidade e a resistência final do concreto produzido.

A presença de quartzo (SiO<sub>2</sub>) em quantidades ideais e finamente divididas contribui para o aumento da resistência mecânica do produto, pois com o CaO forma o silicato de cálcio. Em excesso a SiO<sub>2</sub> reduz muito a trabalhabilidade, a plasticidade e a resistência da massa (SANTOS, 2013).

## Análise química por FRX

O resultado da análise química por FRX da amostra, demonstra uma grande concentração de óxido de silício, também chamado de sílica ( $\text{SiO}_2$ ), óxido de alumínio ou alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ) e óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) nos materiais ensaiados, similar a composição do cimento portland, porém em menores proporções. A Tabela 6 apresenta a composição química da amostra do RM analisada.

Tabela 6—Composição química a partir do resultado da análise de FRX

Óxidos	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{SrO}$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{TiO}_2$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{MgO}$	$\text{Na}_2\text{O}$	Outros óxidos	P.F.
%	54,23	13,83	0,04	6,42	11,9	1,07	3,99	4,35	2,97	0,23	3,4

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

A análise identificou teor de óxido de magnésio ( $\text{MgO}$ ) de 4,35%. Este componente ao se hidratar apresenta expansão no volume do concreto, contribuindo para a diminuição da retração hidráulica. Os metais alcalinos, como o óxido de potássio e óxido de sódio tem efeito ligante, promovendo a reação química durante a etapa de hidratação química (SILVA; GOMES, 2019).

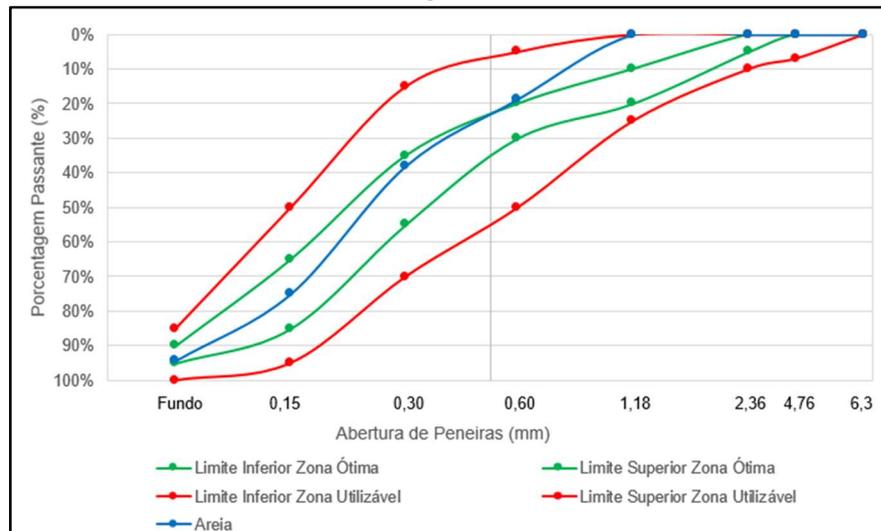
## Análise Granulométrica

A composição granulométrica dos agregados foi analisada para medir e controlar a distribuição dos tamanhos das partículas utilizadas na produção do concreto. A partir deste ensaio foi possível identificar a dimensão máxima características dos agregados e o módulo de finura dos agregados. Após o ensaio, foi elaborada uma curva representativa para cada agregado, baseada nas quantidades retidas acumuladas em valores percentuais. As curvas, exibidas graficamente, foram comparadas aos limites inferior e superior definidos pela NBR ABNT 7211 (2022) para agregados de concreto, com o propósito de caracterizar os materiais utilizados na produção do concreto.

No ensaio de granulometria, foram identificados os comportamentos da curva granulométrica, bem como o módulo de finura e a dimensão máxima dos agregados.

Durante a execução do ensaio de granulometria, foi observado que os agregados miúdos (agregado natural e resíduo) utilizados possuem comportamento diferente, conforme apresentado no Gráfico 4— Curva granulométrica da areia e no Gráfico 2 — Curva granulométrica do resíduo de marmoraria.

Gráfico 4 – Curva granulométrica da areia

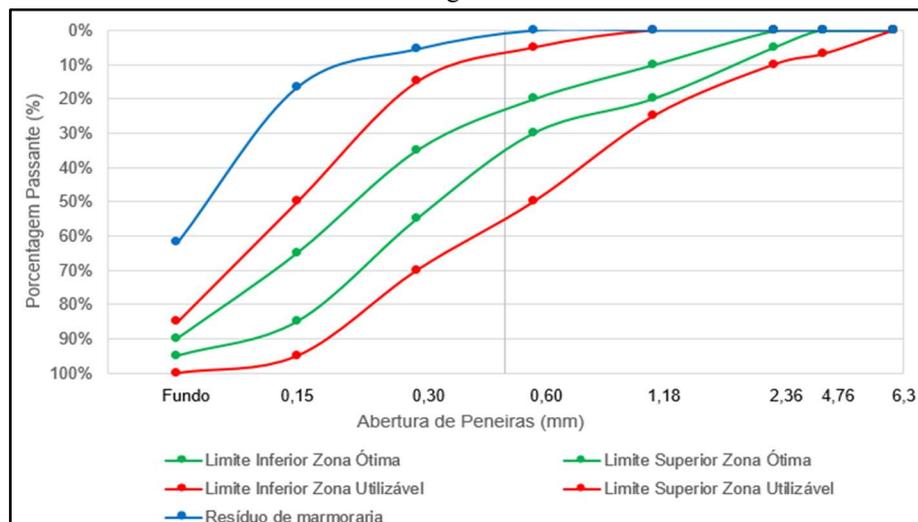


Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Para o agregado natural (areia), os percentuais concentram-se na região da zona utilizável, atendendo assim a regulamentação normatizada.

Já no ensaio de granulometria do resíduo de marmoraria foi constatado que o resíduo se encontra fora dos limites da zona utilizável, apresentando um maior teor de finos que o recomendado por norma. Portanto, faz-se necessário realizar estudos específicos de forma a ratificar a utilização do mesmo para o emprego no material do concreto, verificando a finalidade a ser obtida para objeto da pesquisa.

Gráfico 5 – Curva granulométrica do RM



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Materiais que apresentam grãos muito fino provavelmente necessitarão de mais água na mistura para garantir uma melhor trabalhabilidade, o que poderá comprometer a resistência mecânica do concreto, no entanto, o material pode contribuir para melhor compacidade.

De acordo com as curvas granulométricas apresentadas, torna-se possível conhecer o módulo de finura e o diâmetro máximo dos agregados analisados, conforme pode ser observado na Tabela 7.

Tabela 7 – Resultado do ensaio de granulometria dos agregados miúdos.

<b>AREIA</b>	Módulo de Finura	1,90
	Diâmetro máximo (mm)	2,36
<b>RM</b>	Módulo de Finura	0,57
	Diâmetro máximo (mm)	0,30

Fonte: elaborado pela autora (2025)

A partir da tabela, é factível que o módulo de finura está diretamente relacionado com o tamanho das partículas dos agregados, de modo que quanto maior for o módulo de finura, maiores serão suas partículas. A NBR NM 248 (ABNT, 2003) estabelece que o agregado miúdo com módulo de finura entre 2,20 e 2,90 enquadra-se na zona ótima, entre 1,55 e 2,20 na zona utilizável inferior e entre 2,90 e 3,50 na zona utilizável superior. Logo, percebe-se que a areia na zona utilizável inferior e o resíduo de marmoraria não se enquadra dentro dos limites. Essa medida é inversamente proporcional ao percentual de reposição do agregado, isto significa que à medida que o percentual de resíduo aumenta, o módulo de finura diminui.

#### *Massa específica*

O valor de massa específica da areia e do RM foi estabelecido conforme ensaio da NBR NM 52/2009, onde é possível observar que a mesma possui um valor inferior ao da areia, pois possui um alto teor de materiais finos. Os valores obtidos são apresentados na Tabela 6.

#### *Massa unitária*

Foi verificada a massa unitária da areia, assim como do RM conforme a NBR NM 45 da ABNT (2006), e os resultados encontrados são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Resultado da caracterização física dos agregados miúdos.

<b>Caracterização física da AREIA</b>	
Massa específica (NM 52/2009)	2,597 g/cm <sup>3</sup>
Massa unitária (NM 45/2006)	1,526 g/cm <sup>3</sup>

Caracterização física do RM	
Massa específica (NM 52/2009)	2,849 g/cm <sup>3</sup>
Massa unitária (NM 45/2006)	1,683 g/cm <sup>3</sup>

Fonte: elaborado pela autora (2025)

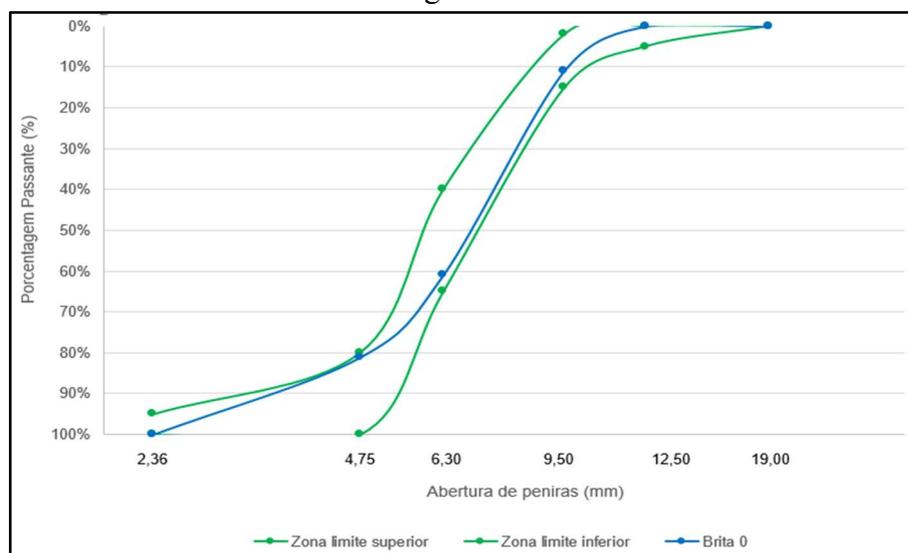
### 4.3. Agregado graúdo

Assim como o agregado miúdo, o agregado graúdo também influencia diretamente nas propriedades apresentadas pelo concreto, tanto em seu estado fresco como no seu estado endurecido. Neste trabalho, a brita 0 foi utilizada com finalidade de conferir resistência mecânica ao concreto, além de reduzir a retração e controlar a fissuração.

#### *Análise Granulométrica*

Para o agregado graúdo utilizado, o resultado da curva granulométrica resultante do ensaio de granulometria da brita utilizada, está apresentada no Gráfico 3.

Gráfico 6 – Curva granulométrica da brita 0



Fonte: Elaborado pelo autora (2025)

Com base na figura apresentada, observa-se que a brita analisada está dentro da faixa de classificação correspondente à brita 0. Assim, o agregado graúdo utilizado na pesquisa atende aos limites de distribuição granulométrica estabelecidos pela norma NBR 7211 (ABNT, 2009).

A análise granulométrica é crucial na avaliação das propriedades, permitindo identificar oportunidades de melhorar a compacidade, a trabalhabilidade e a resistência do concreto.

### *Massa específica*

A massa específica para os agregados graúdos, seguiu-se a NBR NM 53 da ABNT (2009), e o valor obtido está apresentado na Tabela 7.

### *Massa unitária*

Foi verificada a massa unitária da brita 0, conforme a NBR NM 45 da ABNT (2006), e o resultados obtido está apresentado na Tabela 7.

### *Absorção de Água*

O teor de absorção de água do agregado graúdo também foi verificado. Segundo Neville(2016), a capacidade de absorção de água está diretamente ligada à porosidade e permeabilidade do material, fatores que podem impactar aspectos como a resistência, durabilidade, aderência entre o agregado e a pasta de cimento, resistência à abrasão do concreto e sua estabilidade química.

Os resultados obtidos dos ensaio de caracterização física da brita 0 estão representados na Tabela 9.

Tabela 9– Resultado da caracterização física do agregado graúdo

<b>Caracterização física da BRITA 0</b>	
Massa específica (NM 53/2009)	2,789 g/cm <sup>3</sup>
Massa unitária (NM 45/2006)	1,428 g/cm <sup>3</sup>
Absorção de água (NM 53/2009)	0,95 %

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

#### **4.4. Aditivo químico**

Não foram realizados ensaios para caracterização do aditivo químico, visto que não houve variação deste material. Porém, foi observada a análise física do aditivo a partir dos dados fornecidos pelo fabricante, conforme apresentado na Tabela 10.

Tabela 10- Caracterização do aditivo químico utilizado

<b>Caracterização física do aditivo químico</b>
<b>Aditivo Plastificante e Acelerador</b>
Base química: sais sulfonados e carboidratos em meio aquoso
Aspectro / Cor: líquido marrom escuro;
Densidade: 1,06 +/- 0,02 kg/L
Valor do pH: 6,0 +/- 1,0
Atende aos requisitos da ABNT NBR 11768
Dosagem recomendada: 0,2% a 0,4% sobre a massa de cimento, 100 a 200 ml para 01 saco de cimento (50kg)
Fonte: Dados fornecido pelo fabricante (2024)

## 4.5. Caracterização do concreto no estado fresco

### 4.5.1. Consistência

Determinou-se a trabalhabilidade do concreto segundo o ensaio de abatimento do tronco cone (slump test), de acordo com a ABNT NBR 16889/20. A amostra de concreto ensaiada foi obtida conforme procedimentos de preparação e coleta de acordo com a ABNT NBR 16886/20.

Tabela 11– Resultados do ensaio de consistência do concreto

<b>Ensaio de Abatimento de Tronco de Cone</b>			
<b>Traço</b>	<b>Relação a/c</b>	<b>Aditivo Plastificante (mm)</b>	<b>Abatimento (mm)</b>
T0	0,45	100	15
T10	0,45	100	14
T20	0,45	100	10
T30	0,45	100	10

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Após obtenção dos dados da Tabela 11, constata-se o aumento na consistência dos concretos produzidos com a incorporação do RM. Durante a fase de amassamento da mistura foi notado que a medida que aumentava a fração do RM era reduzido a trabalhabilidade, já que o concreto se tornava mais seco. Isso justifica provavelmente, pelo aumento da superfície específica dos agregados reciclados por conterem maior quantidade de finos. A relação de

água cimento estabelecida no traço de referência (T0) foi mantida nos demais traços produzidos.

#### 4.6. Caracterização do concreto no estado endurecido

##### 4.6.1. Resistência a Compressão Axial

Os ensaios foram realizados nas idades de 7 e 28 dias, para todas as frações de substituição, com o propósito de verificar a influência do RM no concreto a curto e longo prazo. Foram ensaiados 12 corpos de prova de cada traços produzidos, sendo 6 unidades para cada idade, totalizando 48 amostras. A proporção de cimento e agregados utilizadas foi de 1:4:0,45 e o consumo de cimento da ordem de 313 kg/m<sup>3</sup>.

Segue resultados apresentados na Tabela 12, de acordo com as proporções estabelecidas:

Tabela 12– Resultados do ensaio de compressão axial

Traço	Idade	Resistência Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
T0	7 dias	13,56	1,98
	28 dias	14,79	3,81
T10	7 dias	13,65	1,49
	28 dias	14,06	1,71
T20	7 dias	17,55	1,13
	28 dias	18,11	3,07
T30	7 dias	14,011	1,64
	28 dias	17,76	1,75

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Todas as misturas produzidas apresentaram resistência mecânica abaixo de 20 Mpa, o que configura que os concretos somente poderão ter finalidade para uso não estruturais (ABNT NBR 8953/2015). Entretanto, no Gráfico 7 é possível visualizar a linha de tendência com aumento de resistência com a incorporação do RM.

Gráfico 7– Comparação dos resultados do ensaio de compressão axial.



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Os resultados de resistência à compressão obtidos nesta pesquisa mostram certa coerência com os valores geralmente observados em misturas que utilizam substituição de seus constituintes por pó de mármore, conforme apontado na revisão bibliográfica.

Alguns pesquisadores que estudaram a substituição de mais de 20% do RM como agregado miúdo notaram uma redução na eficiência mecânica do concreto conforme aumentavam a porcentagem de substituição (BATISTA, 2022; LEITE, 2001; DOURADO et al., 2020). Segundo alguns autores, essa influência na resistência à compressão pode estar relacionada à elevada relação a/c necessária para manter a trabalhabilidade, além da porosidade e alto teor de finos, que resultam em uma maior taxa de absorção de água e comprometem a qualidade do concreto (ABOUELNOUR et al., 2024).

De acordo com concretos confeccionados com agregados triturados, com formato angulosos e textura rugosa, apresentam resistência superior aos concretos confeccionados com agregados naturais, com grãos arredondados e lisos devido ao melhor intertravamento e maior aderência com a pasta de cimento (METHA et al. 2016).

#### 4.6.2. Módulo de Elasticidade

O módulo de elasticidade do concreto é controlado pelos módulos de elasticidade dos seus componentes, principalmente dos agregados. Portanto, vários fatores podem influenciar.

Neste trabalho, todos os corpos de prova tiveram o módulo de elasticidade medido (Figura 13).

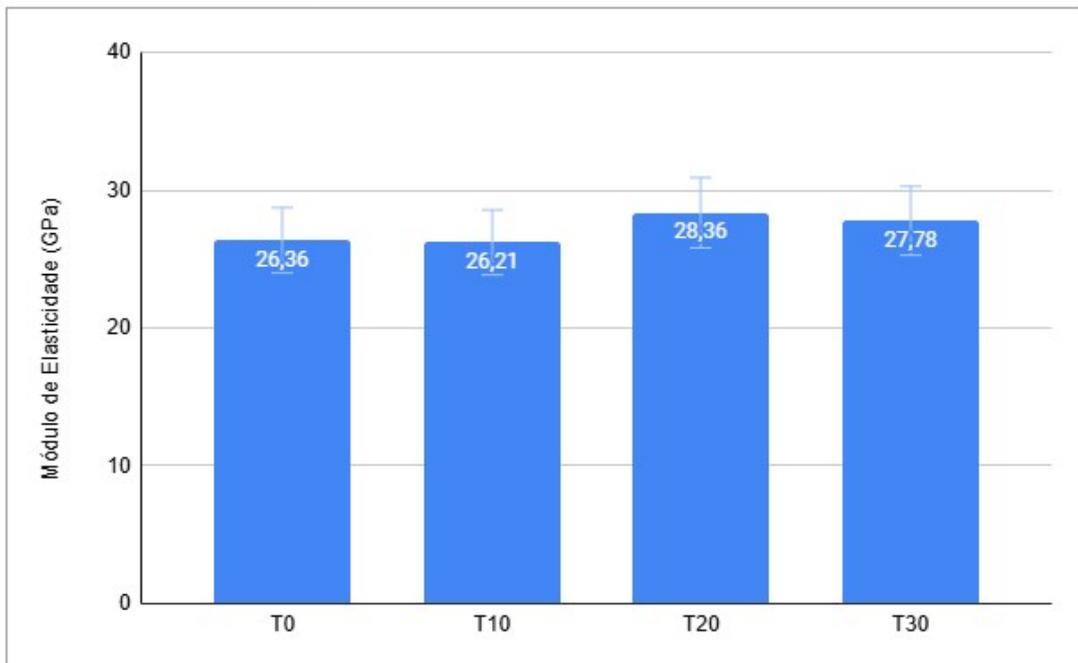
Tabela 13– Resultados do ensaio de módulo de elasticidade.

Traço	Módulo de Elasticidade (GPa)	Desvio Padrão(GPa)
T0	26,36	0,71
T10	26,21	3,80
T20	28,36	8,94
T30	27,78	1,87

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Estes resultados demonstrou como os agregados do concreto e suas características específicas influenciam as variações no módulo de elasticidade do concreto.

Gráfico 8– Comparação dos resultados do ensaio de módulo de elasticidade.



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

O gráfico 8 mostra um comparativo dos resultados dos módulos de elasticidade estático aos 28 dias, nos diferentes concretos produzidos. Os resultados apresentam uma boa

correlação entre a relação do desempenho encontrado na resistência a compressão versus módulo de elasticidade, ambos os ensaios para todas as misturas do concreto.

#### 4.6.3. Absorção de Água

A determinação de absorção de água na peça de concreto consiste na razão da massa seca e da massa saturada. Os ensaios para determinação da absorção de água por imersão nos corpos de prova foram realizados conforme as diretrizes da norma NBR 9778 (ABNT, 2005). A absorção foi calculada com base na média dos resultados individuais obtidos aos 28 dias. Os resultados finais estão apresentados na Tabela 11.

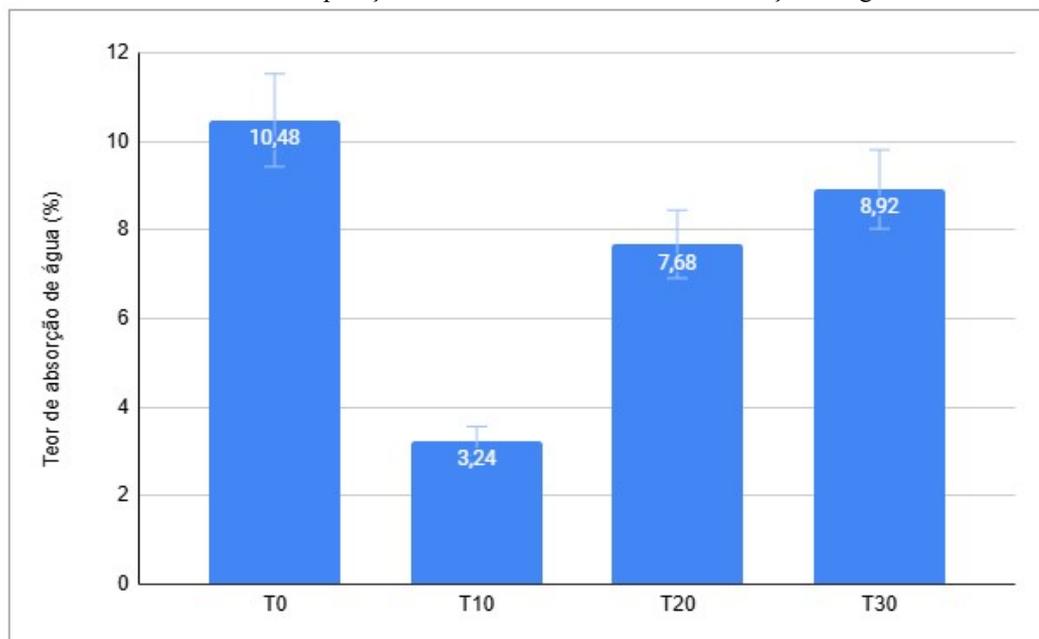
Tabela 14– Resultados do ensaio de absorção de água.

Traço	Teor de absorção de água (%)	Desvio Padrão (%)
T0	10,48	1,35
T10	3,24	0,57
T20	7,68	0,22
T30	8,92	0,05

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

No Gráfico 9 pode-se observar que a absorção de água tem relação diretamente proporcional com a resistência mecânica.

Gráfico 9– Comparação dos resultados do ensaio de absorção de água.



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

A relação a/c de 0,45 adotada nesta pesquisa mostrou-se insuficiente para garantir uma boa trabalhabilidade do material. Isso resultou na ausência de abatimento, dificultando o adensamento adequado do concreto nos moldes. Após a desmoldagem, foram observados vazios na superfície dos corpos de prova, evidenciando um aumento na porosidade interna da estrutura, o que levou a uma consequente redução na resistência.

Cruz et al. (2020), produziram *pavers* com substituição parcial do cimento por resíduo de corte de mármore e granito, nos teores de 10% e 20%, e encontrou resultados que indicaram aumento da resistência à compressão de 1,05% para as amostras em que o cimento foi substituído na proporção de 10%, e diminuição de 0,94% para aquelas em que a substituição correspondeu a 20%.

A incorporação de resíduos de mármore e granito também em argamassas comprovaram uma matriz menos porosa e mais homogênea. A variação da relação água/cimento impacta na propriedade de resistência à compressão das argamassas, visto que, quanto menor o fator água/cimento, maior o resultado de resistência à compressão. Portanto, menor teor de vazios e porosidade.

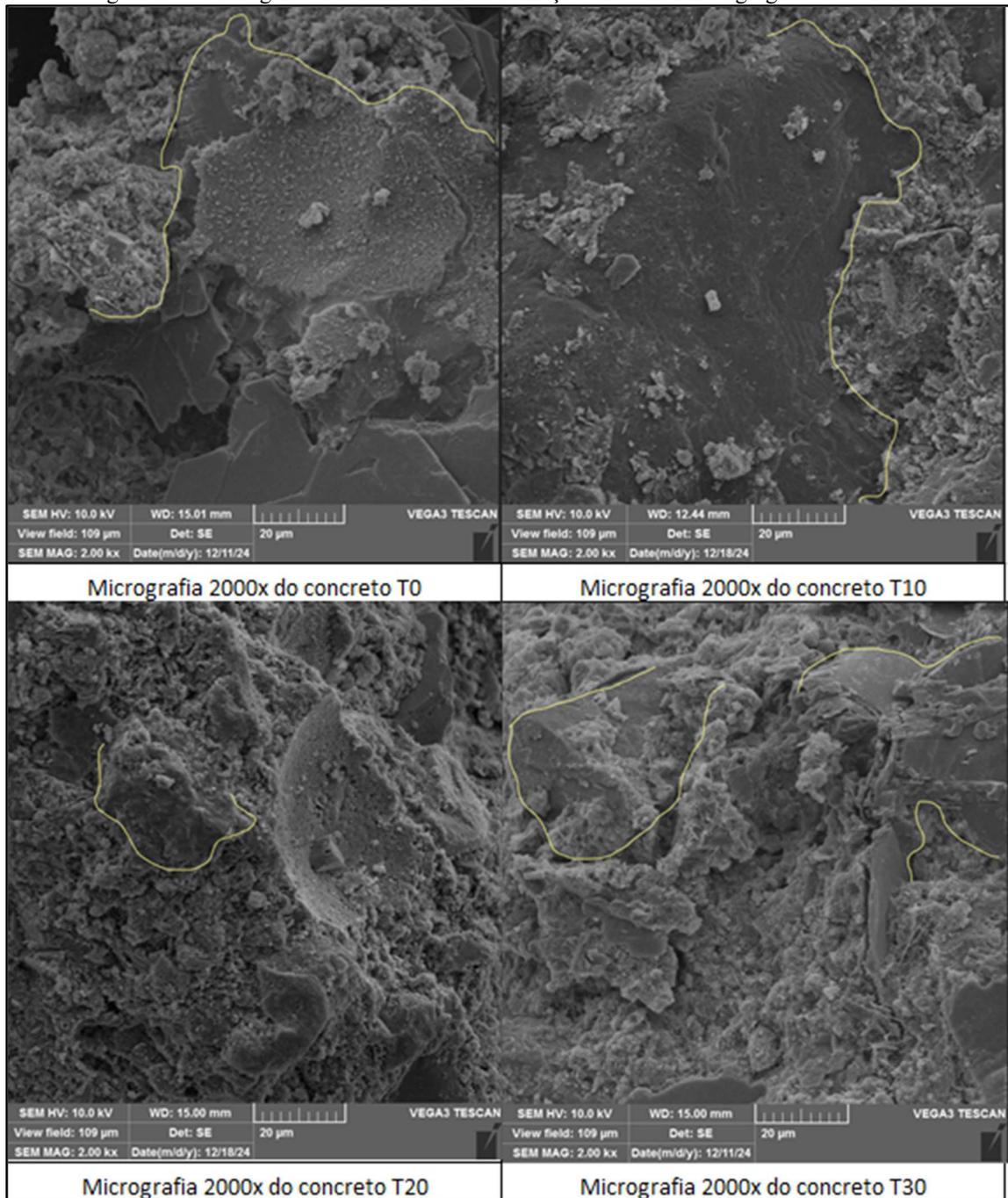
Portanto, a partir da análise dos resultados obtidos, e dados encontrados na literatura, pode-se dizer que a resistência à compressão e a absorção de água dos concretos estão inversamente relacionados (ALMADA; SANTOS; SOUZA, 2022).

#### **4.6.4. Análise de Microscopia Eletrônica de Varredura**

A microestrutura das amostras do concreto foi examinada utilizando microscópio eletrônico de varredura. Na análise de MEV, a superfície da amostra a ser examinada é varrida com um feixe de elétron, e o feixe de elétron retro-espalhado é coletado e depois exibido na mesma taxa de varredura sobre um tubo de raio (SILVA; LIBORIO, 2010). Neste estudo, a superfície das amostras foram recobertas por um fino revestimento metálico, para ser eletricamente condutivo, para obtenção da análise qualitativa das composições localizadas nas superfícies das amostras. As amostras foram obtidas das regiões de fratura após os ensaios de compressão aos 28 dias. Foi possível confrontar homogeneização, porosidade e microfissuras da matriz do cimento nos quatro traços desenvolvidos.

O estudo da microestrutura do material proporcionou uma compreensão da zona de transição entre a matriz e o agregado no concreto com a adição do resíduo, o qual será apresentado na Figura 22 com mais detalhes.

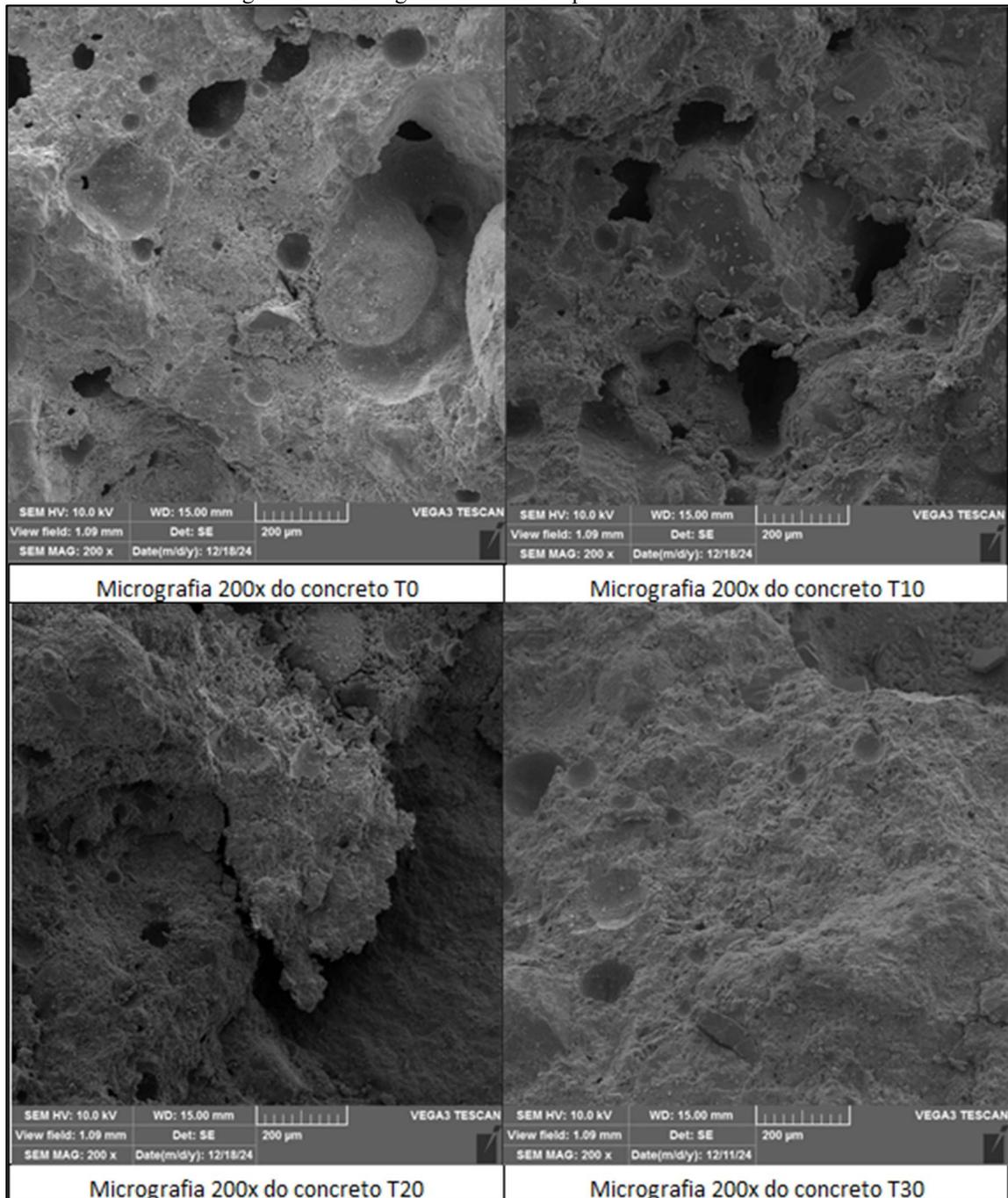
Figura 23 – Micrografia ilustrando zona de transição entre matriz e agregado do concreto



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Após observada a interface (zona de transição) formada pelos componentes utilizados no concreto, foi realizada verificação de existência de poros (vazios) no material. É possível verificar na figura 23, a porosidade da interface entre o a pasta e o agregado graúdo, e identificar as diferentes fases presentes pela diferença de tonalidade na micrografia. Cabe registrar que estas imagens foram obtidas utilizando elétrons secundários. A análise foi realizada para todos os traços desenvolvidos.

Figura 24 – Micrografia ilustrando a porosidade do concreto

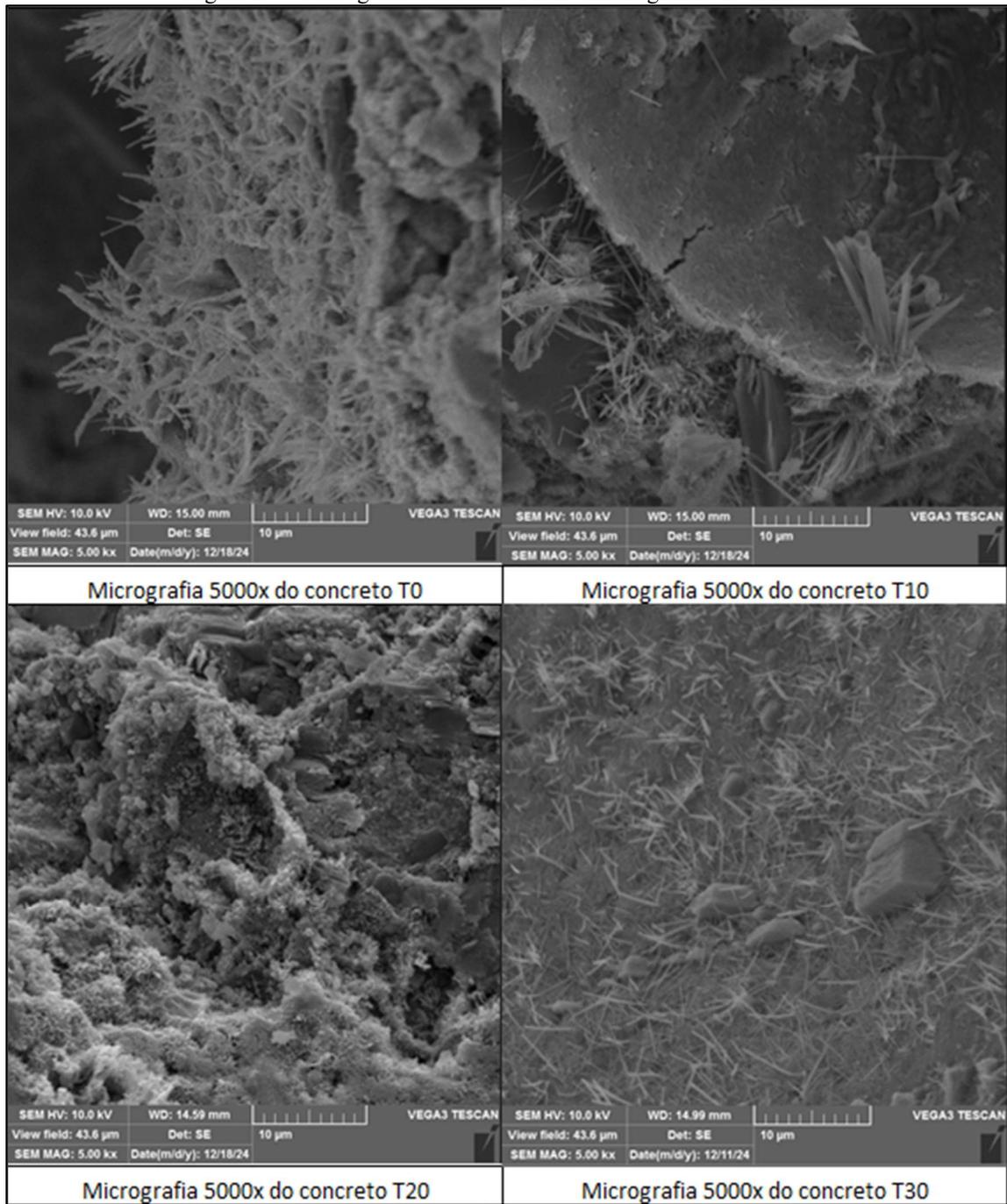


Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Embora a porosidade não tenha sido quantificada, é perceptível que o concreto de T0 e T10 apresentaram uma maior porosidade em comparação com os concretos nos quais a areia natural foi substituída pelo RM. Essa diferença é notável tanto na quantidade quanto na dimensão dos poros presentes nas amostras.

Após análise da zona de transição após reação química dos componentes, seguido da verificação da porosidade, foi então evidenciado a existência de minerais formados a partir da reação das substâncias do concreto (Figura 24).

Figura 25 – Micrografia ilustrando a fase cristalográfica do concreto



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Constatou-se o mecanismo básico de aderência entre os componentes do concreto com presença do silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e entrelaçamento de suas fibras no concreto. Não foi observada penetração significativa do C-S-H nos substratos, sendo observada sua deposição na superfície. Mehta & Monteiro (2008) afirma que os C-S-H representam de 50 a 60% do volume de sólidos da pasta de cimento totalmente hidratada,

sendo responsáveis por suas principais propriedades. E a etringita é resultado da hidratação do aluminato de cálcio com o gesso, adicionado na fabricação do cimento.

As análises microestruturais nos poros encontrados na interface revelaram que a interface é rica em etringita, a qual apresenta-se na forma de bastões de formato fino e pontiagudo. Vale ressaltar que a presença de etringita em quantidades maiores pode causar fissuras na superfície do concreto, afetando a resistência e a durabilidade do mesmo.

## 5. CONCLUSÃO

Considerando os resultados obtidos nos experimentos, pode-se concluir:

- ✓ Quanto a resistência a compressão: o concreto T20 com teor de 20% de substituição da areia natural por RM obteve a maior resistência mecânica, nas idades de 7 e 28 dias se comparado aos demais traços produzidos. Foi observado uma pequena redução da resistência do concreto com teor de substituição entre T0 e T10 apenas aos 7 dias, devido talvez pelo processo de execução manual e/ou mal adensamento na etapa de mistura dos materiais. A redução máxima alcançada na resistência à compressão em relação ao concreto referência foi no concreto com 30% de substituição.
- ✓ Quanto ao módulo de elasticidade: os resultados do módulo de elasticidade entre os concretos T0 e T10 não assinalou diferença significativa entre eles. Já o concreto T20 teve acréscimo no módulo de elasticidade em conformação com a resistência a compressão, garantindo menor tendência de deformação elástica e menor risco de patologia, se comparado ao T0, T10 e T30. Já o concreto T30 teve uma redução se comparado aos outros concretos produzidos, ao mesmo tempo que reduziu a resistência a compressão. Ficando entendido devido a relação água cimento ter sido mantida, e o traço com substituição de 30% comportou maior quantidade de finos, a hidratação dos finos não ocorreu de forma eficiente vindo a corroborar negativamente no desempenho do T30.
- ✓ Quanto a absorção de água: foi observado com os resultados que a porosidade e o teor de absorção de água apresentaram resultados similares. O concreto referência absorveu menor quantidade de água em comparação aos concretos com agregado reciclado, tendo um aumento máximo de absorção na mistura de 30% de

substituição. Foi possível observar que ao incrementar a quantidade de pó residual de marmoraria, há um aumento no número de poros, o que contribui para uma maior absorção de água e um aumento nos interstícios dos concretos. Entretanto, a relação água cimento utilizada vem a contribuir de forma significativa visto que o RM por ser material muito fino, vai necessitar de mais água para o processo químico de hidratação do concreto.

- ✓ Quanto a microscopia eletrônica de varredura: verificou-se que os concretos desenvolvidos apresentaram uma estrutura mais uniforme, caracterizada por menor porosidade (tanto em relação à quantidade de poros quanto ao seu tamanho) e por um número reduzido de fissuras em comparação ao concreto de referência.

Ao final deste trabalho foi possível determinar a viabilidade da substituição parcial do agregado natural areia pelo resíduo de marmoraria. De acordo com os resultados analisados, conclui-se que é promissor o emprego do RM em concretos para uso não estrutural como passeio para pedestres, blocos de vedação e/ou material cimentício como artefatos pré-moldados sem fins estruturais, devido resistência mecânica abaixo de 20 MPa. O traço obtido como mais satisfatório em relação a resistência à compressão e absorção de água foi o traço T20, que apresentou melhores resultados em todos requisitos em relação ao traço de referência (T0). Todavia fica perceptível que o uso da RM no concreto é um campo de estudo que vale a pena ser devidamente aprofundado em publicações futuras, quando associados a outros resíduos e componentes químicos que possam elevar sua resistência mecânica e durabilidade do concreto.

Conclui-se como favorável a possibilidade de sua utilização principalmente pelos benefícios trazidos ao meio ambiente, uma vez que este tipo de resíduo não seria mais lançado em aterros, lixões e terrenos baldios, e contribuiria para a redução da extração do recurso da natureza, evitando qualquer tipo impacto no solo. A utilização do RM em concretos constitui-se numa opção de aproveitamento do resíduo, sendo uma forma de ação na busca do desenvolvimento sustentável para a indústria da construção civil.

## 6. TRABALHOS FUTUROS

Dada a relevância do tema, sugere-se o prosseguimento dos estudos para que o entendimento seja ampliado. Dessa forma, como sugestão para trabalhos futuros e continuidade desse projeto, sugere-se:

- ✓ Repetir os experimentos com maior controle tecnológico do processo de produção do concreto (mecanizado);
- ✓ Utilizar maiores teores de relação água/cimento;
- ✓ Fazer variação de traços em decorrência da granulometria do resíduo (alto teor de finos);
- ✓ Teste com misturas de outros resíduos (mineração, pó de brita).

## REFERÊNCIAS

ALIABDO, A. A.; ABD ELMOATY, A. E. M.; AUDA, E. M. Re-use of waste marble dust in the production of cement and concrete. *Construction and Building Materials*, v. 50, p. 28–41, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.005>. Acesso em: 05 jun. 2024.

ABOUELNOUR, M. A; EL-AZIZ, M. A. A; OSMAN, K. M; FATHY, I. N; TAYEH, B. A; ELFAKHARANY, M. E. (2024). Recycling of marble and granite waste in concrete by incorporating nano alumina. *Construction and Building Materials*, 411(134456), 134456. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023>.

ALMADA, B. S.; SANTOS, W. J. dos; SOUZA, S. R. Marble and granite waste as mineral addition in mortars with diferente water-cement ratios. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 22, n. 4, p. 7-22, out./dez. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRO DE CIMENTO PORTLAND. ABCP. Disponível em <http://www.abcp.org.br/> Acesso em: 7 mai. 2024

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RESÍDUOS E MEIO AMBIENTE. ABREMA – Panorama do Resíduos Sólidos no Brasil 2024. Disponível em: [file:///C:/Users/acer/Downloads/Panorama\\_2024\\_v4.pdf](file:///C:/Users/acer/Downloads/Panorama_2024_v4.pdf). Acesso em: 09 fev. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS. ABIROCHAS. Cenário Mundial. Disponível em: <https://abirochas.com.br/dados-setoriais/panorama-setorial/>. Acesso em: 6 jan. 2025.

AKBAR, M. et al. Concrete matrix based on marble powder, waste glass sludge, and crumb rubber: pathway towards sustainable concrete. **Frontiers in Materials**, v. 10, n. January, p. 1–19, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fmats.2023.1329386> . Acesso em: 11 jan. 2025.

AMORIM, M. M. et al. Incorporação de resíduos de rochas ornamentais na produção de cerâmica vermelha: uma abordagem sustentável. **OBSERVATÓRIO DE LA ECONOMÍA LATINO AMERICANA**, v. 21, n. 11, p. 18712–18724, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5738:2015**: Versão corrigida: Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. 2 ed. Rio de Janeiro, RJ: ABNT, 2015. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7211:2022**: Agregados para concreto - Requisitos. 4 ed. Rio de Janeiro, RJ: ABNT, 2022. 10 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT NBR 8522-1** – Concreto endurecido – Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação - Parte 1: Módulos estáticos à compressão. 1 ed. Rio de Janeiro, RJ: ABNT, 2021. 24 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT NBR 11768:2019**: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Parte 1: Requisitos. 1 ed. Rio de Janeiro, RJ: ABNT, 2019. 27 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14656** – Cimento Portland e Matérias-primas – análise química por espectrometria de raios-X – Métodos de ensaio.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15900-1:2009**: Água para amassamento do concreto Parte 1: Requisitos. 1 ed. Rio de Janeiro, RJ: ABNT, 2009. 11 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16697:2018**: Cimento Portland — Requisitos. 1 ed. Rio de Janeiro, RJ: ABNT, 2018. 12 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16886:2020**: Concreto — Amostragem de concreto fresco. 1 ed. Rio de Janeiro, RJ: ABNT, 2020. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT NBR NM 52:2002**: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. 1 ed. Rio de Janeiro, RJ: ABNT NM, 2002. p. 6.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT NBR NM 53:2009** – Agregado graúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente. 2 ed. Rio de Janeiro, RJ: ABNT NM, 2009. p. 8.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 248:2001**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. 1 ed. Rio de Janeiro, RJ: ABNT, 2001. 6 p.

BARATTO, V. M. Z. et al. Estimativa de geração de resíduos da construção civil no município de Medianeira (PR) no ano de 2022. **Viii Encontro Nacional De Aproveitamento De Resíduos Na Construção**, v. 8, p. 1–6, 2023.

BATISTA, L. S. et al. **Utilização do resíduo de rochas ornamentais em blocos de concreto para pavimento intertravado**. In: 7º Congresso Sul Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade, 2024, Curitiba-PR.

BATISTA, L. S. **Efeitos da incorporação de resíduos da mineração nas propriedades físicas, mecânicas e durabilidade em pavimentos intertravados**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Processos da Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande. 2022.

CARVALHO, A. R. DE., SILVA JÚNIOR, G. DA., FONTES, W. C., SILVA, G. J. B., PEDROTI, L. G., & OLIVEIRA, T. M. DE .. (2023). Influência do efeito filer do pó de mármore na produção de concretos para pavimentos intertravados. *Ambiente Construído*, v. 23, n. 4, p 217–239, out./dez. 2023. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212023000400700>

CONAMA. RESOLUÇÃO No 307, DE 5 DE JULHO DE 2002. v. 2015, p. 4–5, 2002.

CUSTODIO, A. R. F., GOMES, Q. C., & CAVERZAN, D. (2023). Aproveitamento Econômico Dos Rejeitos E Resíduos Do Beneficiamento Das Rochas Ornamentais: Revisão Bibliográfica. *Revista Ifes Ciência*, 9(2), 01–09. <https://doi.org/10.36524/ric.v9i2.1951>.

DA CRUZ, A. C. F., CABRAL, R. DE F., BANDEIRA, C. F., & MONTORO, S. R.

(2020). Caracterização Do Resíduo De Corte De Mármore E Granito De Marmoraria E Análise Da Viabilidade De Substituição Parcial Do Cimento Portland Para Produção De Paviers. *Revista Univap*, 26(51), 91–107. <https://doi.org/10.18066/revistaunivap.v26i51.2444>.

DE ALMEIDA BARBOSA FRANCO, J., DOMINGUES, A. M., DE ALMEIDA AFRICANO, N., DEUS, R. M., & BATTISTELLE, R. A. G. (2022). Sustainability in the civil construction sector supported by Industry 4.0 Technologies: Challenges and opportunities. *Infrastructures*, 7(3), 43. <https://doi.org/10.3390/infrastructures7030043>.

DE ARAUJO, T. C. B., & DOURADO, H. (2020). Avaliação De Desempenho De Paviers Intertravado Produzidos Com Rejeitos Gerados Nos Desdobramentos De Rochas Ornamentais. *REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil*, 15(2), 245–261. <https://doi.org/10.5216/reec.v15i2.60435>

DEDAVID, B. A.; CARMEN, I. G.; MACHADO, G. Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras: materiais poliméricos, metálicos e semicondutores. – Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007.

FARIAS, U. M. DA S. M.; LEITE, M. B.; DE CERQUEIRA, L. B. Uso de lama residual de concreto como agregado miúdo para produção de novos concretos: Use of residual concrete sludge as fine aggregate for new concrete production. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 11, p. 70612–70629, 2022.

FARIAS, U. M. DA S. M.; LEITE, M. B.; RODRIGUES, J. P. Avaliação do módulo de elasticidade de concreto com agregado graúdo reciclado de concreto. *Brazilian Journal of Development*, v. 10, n. 11, p. e74881, 2024.

FROTTÉ, C., NUBILA, C. S. A. D., NAGALLI, A., MAZER, W., MACIOSKI, G., & OLIVEIRA, L. O. S. DE. Estudo das propriedades físicas e mecânicas de concreto com substituição parcial de agregado natural por agregado reciclado proveniente de RCD. *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 22, n. 2, p. e11811, 2017.

GARCIA, F. M., PEREIRA, V. A., & DA SILVA, R. F. (2023). Organizational dynamics in civil construction: Sector study on corporate social and environmental responsibility in companies in Brazil, Mexico and the United States of America. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, 17(1), e 03106. <https://doi.org/10.24857/rgsa.v17n1-002>.

CHANDRASEKHAR REDDY, K. (2023). Effect of solid waste on concrete performance: Innovative use of recycled and secondary materials. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.152>

JAIN, A; GUPTA, R; CHAUDHARY, S. Performance of Self-Compacting Concrete Comprising Granite Cutting Waste as Fine Aggregate. *Construction and Building Materials*, v. 221, p. 539–552, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.104>. Acesso em: 14 jul. 2024.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto Microestrutura, Propriedade e Materiais* – 3ª edição. Ed.: IBRACON, 2008.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete**: microstructure, properties, and

materials. 4. ed. New York, NY: McGraw Hill, 2014.

NAGALLI, A. **Gerenciamento de resíduos sólidos na construção civil**, 2014.

NASCIMENTO, C. F. G.santos et al. Viabilidade da substituição parcial do resíduo de construção civil pelo agregado miúdo nas propriedades físicas e mecânicas do concreto. *Brazilian Journal of Development*, v. 6, n. 8, p. 62073-62081, 2020.

NASCIMENTO, E. R. DO, MORAIS, D. P. F. DE, & LOPES, S. C. (2022). Sustentabilidade na construção civil no Brasil: Uma revisão da literatura. *Research, Society and Development*, 11(14), e524111436611. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i14.36611>.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5ª ed. Bookman Editora. Porto Alegre p. 887, 2016.

XIE, H.; LI, L. G.; NG, P. Effects of Solid Waste Reutilization on Performance of Pervious Concrete : A Review. 2023.

PAINEL INTERNACIONAL DE RECURSOS DO PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE (PNUMA). Panorama Global de Recursos 2024 Disponível em <https://brasil.un.org/pt-br/262069-panorama-global-de-recursos-2024>. Acesso em: 9 fevereiro 2024.

PETRUCCI, E. G. R.; PAULON, V. A. **Concreto de cimento Portland**. São Paulo: Globo, 2005

PIRAMIDAL (2020). Reduzir, reutilizar e reciclar: Conhecendo os 3 R's. Site: <https://www.piramidal.com.br/blog/3-rs-da-sustentabilidade/#>. Acesso em: 5 jan. 2025

ROQUE, R. A. L., PIERRI, A. C. (2019). Uso inteligente de recursos naturais e sustentabilidade na construção civil. *Research, Society and Development*, 8(2), e3482703. <https://doi.org/10.33448/rsd-v8i2.703>

RATHAN, A. S., SUNITHA. (2022). Mechanical and microstructural study on interlocking concrete block paver using waste granite dust. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(2), 358–371. <https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1746312>.

SILVA, I. A. DA; GOMES, C. E. M. Influência do óxido de magnésio na retração hidráulica de argamassas de cimento Portland (tipo CP-V). *Revista dos Trabalhos de Iniciação Científica da UNICAMP*, n. 26, 2019.

SILVA, V. S., & LIBORIO, J. B. L. (N.D.). *Estudo Da Microestrutura Da Interface Argamassa/Substrato De Concreto Através Da Microscopia Eletrônica De Varredura (MEV)*. Ipen.Br. Retrieved January 20, 2025, from [https://www.ipen.br/biblioteca/cd/cbecimat/2002/arqs\\_pdf/pdf\\_100/tc101-107.pdf](https://www.ipen.br/biblioteca/cd/cbecimat/2002/arqs_pdf/pdf_100/tc101-107.pdf)

SANTOS, C. P. DOS; OLIVEIRA, H. A. DE; SANTOS, A. DE J. Estudo da viabilidade da adição de resíduo de corte de granito na produção industrial de artefatos cerâmicos. *Cerâmica industrial*, v. 29, p. e012901, 2024.

SILVA, L. N. D, FERREIRA, G. A, SOUZA, D. R. Influência do módulo de elasticidade dos agregados para com o módulo de elasticidade do concreto. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano 05, Ed. 11, Vol. 08, pp. 05-22. Novembro de 2020. ISSN: 2448-0959, Link de acesso: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/modulo-de-elasticidade>. Acesso em: 11 jan. 2025

RAJEETH, T. J; SHAH, A, H; MAKHDOMI, S. M; WANI, A. N. Use of copper slag in concrete production – a sustainable solution for solid waste management. Journal of Physics: Conference Series, Volume 1913, International Conference on Research Frontiers in Sciences (ICRFS 2021) 5th-6th February 2021, Nagpur, India. doi:10.1088/1742-6596/1913/1/012066.

WEB, C. E. S. SPOT CURSOS -Reação de Hidratação do Cimento - Autor Yuri Abas Frazão. Disponível em: <<https://spotcursos.com.br/blogs/patologia-da-b-construcao/posts/reacao-de-hidratacao-do-cimento>>. Acesso em: 9 fev. 2025.