

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
COORDENADORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO STRICTO SENSU
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS
MATERIAIS**

**EFEITO DE ADIÇÕES MINERAIS SOBRE A RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA
FLEXÃO, À COMPRESSÃO E NA TRABALHABILIDADE DE ARGAMASSAS**

NATÂN VARGAS DA SILVA

CAXIAS DO SUL

2025

NATÂN VARGAS DA SILVA

**EFEITO DE ADIÇÕES MINERAIS SOBRE A RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA
FLEXÃO, À COMPRESSÃO E NA TRABALHABILIDADE DE ARGAMASSAS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais da Universidade de Caxias do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a. Janete Eunice Zorzi
(período orientação 02/02/2023 - 18/02/2025)

CAXIAS DO SUL

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Universidade de Caxias do Sul
Sistema de Bibliotecas UCS - Processamento Técnico

S586e Silva, Natân Vargas da
Efeito de adições minerais sobre a resistência à tração na flexão, à compressão e na trabalhabilidade de argamassas [recurso eletrônico] / Natân Vargas da Silva. – 2025.
Dados eletrônicos.
Dissertação (Mestrado) - Universidade de Caxias do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, 2025.
Orientação: Janete Eunice Zorzi.
Modo de acesso: World Wide Web
Disponível em: <https://repositorio.ucs.br>
1. Resistência de materiais. 2. Cimento Portland. 3. Argamassa. 4. Materiais. I. Zorzi, Janete Eunice, orient. II. Título.

CDU 2. ed.: 620.193

Catalogação na fonte elaborada pela(o) bibliotecária(o)
Carolina Machado Quadros - CRB 10/2236

EFEITO DE ADIÇÕES MINERAIS DA FORMAÇÃO SERRA GERAL SOBRE A
RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO E À COMPRESSÃO DE ARGAMASSAS

Natão Vargas da Silva

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais da Universidade de Caxias do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais.

Aprovada em: 29 de Março de 2025.

Orientadora:

Prof^a. Dr^a. Janete Eunice Zorzi (período orientação 02/02/2023 - 18/02/2025)
Universidade de Caxias do Sul (UCS)

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Janaina da Silva Crespo (Presidente da Banca)
Universidade de Caxias do Sul (UCS)

Prof. Dr. Ricardo Emilio Ferreira Quevedo Nogueira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Alexandre Fassini Michels
Universidade de Caxias do Sul (UCS)

Prof. Dr. Vinício Ceconello
Universidade de Caxias do Sul (UCS)

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família pelo apoio incondicional e por estar ao meu lado em cada etapa desta jornada. Sua presença, incentivo e dedicação foram fundamentais para que eu chegasse até aqui. Sem vocês, este caminho teria sido muito mais desafiador.

A professora Dr^a. Janete Eunice Zorzi, por sua dedicação, paciência e orientação ao longo deste trabalho. Seu conhecimento e apoio foram essenciais para meu crescimento acadêmico. Sou grato por todo o aprendizado proporcionado.

À Universidade de Caxias do Sul que disponibilizou toda infraestrutura de laboratórios (Laboratório de Tecnologia Construtiva – LBTEC, Laboratório Central de Microscopia – LCMIC, Laboratório de Física e Laboratório de Materiais Cerâmicos).

O Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais (PPGMAT) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela oportunidade e incentivo financeiro.

RESUMO

Os impactos ambientais causados pela atividade humana têm impulsionado, na última década, uma crescente demanda por materiais alternativos, incentivando pesquisas em busca de alternativas com menor impacto ecológico. A utilização de adições minerais com o cimento Portland é uma solução viável para a produção de argamassas mais sustentáveis, além de contribuir para a melhoria das resistências mecânicas e da trabalhabilidade. As adições atuam principalmente como preenchimento dos vazios entre os grãos de cimento, aumentando sua trabalhabilidade, reduzindo a porosidade e, conseqüentemente, aumentando sua resistência. Este estudo investigou os impactos causados pela substituição parcial do cimento Portland por três tipos de pós de rochas provenientes da Formação Serra Geral nas propriedades de trabalhabilidade e resistência mecânica de argamassas. Para isso, foram avaliadas amostras com substituição de 5%, 10% e 15% do cimento por esses materiais, além de uma argamassa de controle, na qual não houve substituição. As propriedades avaliadas incluíram trabalhabilidade, resistência à compressão e resistência à tração na flexão. Os resultados indicaram que as argamassas contendo pós de rocha apresentaram melhor trabalhabilidade, sem perda significativa de resistência mecânica, além de um potencial aumento de resistência ao longo do tempo. Assim, os dados obtidos demonstram a viabilidade técnica da incorporação dessas adições minerais, sem comprometer a resistência e a trabalhabilidade da mistura. Por fim, este estudo sugere que a utilização de resíduos locais, como adições minerais, não compromete a resistência física das argamassas, apresentando um potencial significativo, em um nível de 5 %, para aprimorar suas propriedades. Além disso, essa abordagem se destaca como uma solução sustentável, contribuindo para a redução das emissões de CO₂ na indústria da construção.

Palavras-chave: fíler, resistência à compressão, resistência à tração na flexão, trabalhabilidade, argamassa.

ABSTRACT

The environmental impacts caused by human activity have driven, over the past decade, a growing demand for alternative materials, encouraging research aimed at finding options with lower ecological impact. The use of mineral additions with Portland cement is a viable solution for producing more sustainable mortars, while also contributing to improvements in mechanical strength and workability. These additions primarily act by filling the voids between cement grains, increasing workability, reducing porosity, and consequently enhancing strength. This study investigated the effects of the partial replacement of Portland cement with three types of rock powders from the Serra Geral Formation on the workability and mechanical properties of mortars. For this purpose, samples with cement replacement levels of 5%, 10%, and 15% were evaluated, along with a control mortar containing no replacement. The assessed properties included workability, compressive strength, and flexural tensile strength. The results indicated that mortars containing rock powders exhibited improved workability without significant loss of mechanical strength, along with a potential increase in strength over time. Thus, the findings demonstrate the technical feasibility of incorporating these mineral additions without compromising the mixture's strength and workability. Finally, this study suggests that the use of local waste materials as mineral additions does not compromise the physical strength of mortars, showing significant potential—particularly at a 5% replacement level—to enhance their properties. Moreover, this approach stands out as a sustainable solution, contributing to the reduction of CO₂ emissions in the construction industry.

Palavras-chave: filler, elasticity resistance, flexural tensile strength, workability, mortar.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Resistência média dos tipos de cimento Portland.....	20
Figura 2 - Velocidade de hidratação dos cimentos puros.....	21
Figura 3 - Etapas de hidratação de uma partícula de cimento.....	23
Figura 4 - Relação da resistência à compressão com a finura do cimento.....	24
Figura 5 – Amostras de pós de rochas PR53 (esquerda), PR68 (centro) e PR51 (direita).....	32
Figura 6 - Fluxograma do procedimento experimental.....	33
Figura 7 - Aparelho para determinação da consistência da argamassa normal.....	38
Figura 8 - Etapa após retirada do molde troncônico.....	39
Figura 9 - Espalhamento da amostra de argamassa.....	39
Figura 10 - Equipamento para moldagem dos corpos de prova.....	40
Figura 11 - Distribuição granulométrica do aglomerante e dos pós de rochas.....	47
Figura 12 - Distribuição de frequência dos pós de rochas e do cimento.....	48
Figura 13 - Classificação dos pós de rochas quanto à rocha de origem de acordo com o diagrama TAS: PR68 (dacito), PR53 (basalto andesítico) e PR51 (basalto).....	50
Figura 14 - Classificação geoquímica de rochas vulcânicas, com base no diagrama SiO_2 v.s. $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ em porcentagem, segundo Cox <i>et al.</i> (1987): PR68 (riolito), PR53 (basalto andesítico) e PR51 (basalto).....	51
Figura 15 - Diagrama ternário de $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ (baseado em % em peso) situando a constituição química dos principais grupos de materiais cimentícios suplementares (SCM).....	52
Figura 16 - Comparação entre o difratograma experimental e o difratograma simulado para a amostra PR51. O painel inferior representa a diferença entre os dois difratogramas, experimental e simulado.....	54
Figura 17 - Comparação entre o difratograma experimental e o difratograma simulado para a amostra PR53. O painel inferior representa a diferença entre os dois difratogramas, experimental e simulado.....	55
Figura 18 - Comparação entre o difratograma experimental e o difratograma simulado para a amostra PR68. O painel inferior representa a diferença entre os dois difratogramas, experimental e simulado.....	55
Figura 19 - Classificação modal QAPF de rochas vulcânicas.....	57
Figura 20 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo (Areia).....	59
Figura 21 - Curvas de frequência acumulada de retido e passante para análise granulométrica da areia.....	60

Figura 22 – Abatimento nas misturas de argamassas.....	62
Figura 23 - Resistência média à compressão axial das argamassas aos 28 dias.....	64
Figura 24 - Evolução das resistências médias à compressão das argamassas em dias (D).	67
Figura 25 - Resistência média à tração na flexão das argamassas aos 28 dias.....	68
Figura 26 - Evolução das resistências médias à tração na flexão das argamassas em dias (D).	70
Figura 27 - Microscopia eletrônica de varredura das argamassas com PR51 aos 28 dias - (a, d) CPR51 5 %, (b, e) CPR51 10 %, (c, f) CPR51 15 %.	71
Figura 28 - Microscopia eletrônica de varredura das argamassas com PR53 aos 28 dias - (g, j) CPR53 5 %, (h, k) CPR53 10 %, (i, l) CPR53 15 %.	72
Figura 29 - Microscopia eletrônica de varredura das argamassas com PR68 aos 28 dias - (m, p) CPR68 5 %, (n, q) CPR68 10 %, (o, r) CPR68 15 %.	72
Figura 30 – Micrografias, obtidas por microscopia eletrônica de varredura aos 28 dias no modo elétrons secundários, da superfície de fratura das argamassas nas composições 5 %, (a), (b) e (c), e 10 %, (c), (d) e (e).	73
Figura 31 - Micrografias, obtidas por microscopia eletrônica de varredura aos 28 dias no modo elétrons secundários, da superfície de fratura das argamassas nas composições de 15 %, (a), (b) e (c).	74

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Principais compostos do cimento Portland.	18
Quadro 2 - Teores de substituições de cimento por resíduos de rochas	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição do cimento Portland.....	18
Tabela 2 - Limites de composição do cimento Portland.	19
Tabela 3 - Requisitos de finura do cimento Portland.	25
Tabela 4 - Identificação conforme a adição mineral, dos tipos de argamassas.	37
Tabela 5 - Dimensionamento do traço das argamassas.	38
Tabela 6 - Relação de amostras preparadas em dias.	40
Tabela 7 - Propriedades físicas dos pós de rocha e do cimento.	46
Tabela 8 - Composição química dos pós de rochas.....	49
Tabela 9 - Características gerais das estruturas dos compostos utilizadas nas análises para os pós de rochas.	53
Tabela 10 - Indicadores estatísticos obtidos para cada amostra.	56
Tabela 11 – Estimativa da cristalinidade.....	58
Tabela 12 - Análise de variância dos dados referentes as variáveis do estudo para o espalhamento.	60
Tabela 13 - Teste de Tukey aplicados às médias das variedades de argamassas com relação à variável de referência para o espalhamento (mm).....	62
Tabela 14 - Teste de Tukey aplicados às médias das variedades de argamassas com relação à variável de referência para a resistência à compressão axial (MPa).	63
Tabela 15 - Resultados do teste de Tukey nas médias de resistência à compressão axial das argamassas para diferentes pós de rochas e teores.	65
Tabela 16 - Análise de variância dos dados referentes as variáveis do estudo em relação a resistência à tração na flexão.....	68
Tabela 17 - Teste de Tukey aplicados às médias das variedades de argamassas com relação à variável de referência para a resistência à compressão axial (MPa).	69

LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

μm	Micrometro
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AFt	Trissulfoaluminato de cálcio hidratado
Al_2O_3	Alumina
ANOVA:	Análise de Variância
ARI	Alta resistência inicial
BC	Baixo calor de hidratação
BSE	Dispersão de elétrons retroespalhados
C_2S	Silicato dicálcico
C_3A	Aluminato tricálcico, aluminato tricálcico
C_3S	Silicato tricálcico
C_4AF	Ferroaluminato tetracálcico
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	Hidróxido de cálcio (cal hidratada)
C-A-H	Aluminato de cálcio hidratado
CaO	Óxido de cálcio
CH	Hidróxido de cálcio
CO_2	Dióxido de carbono
COD	<i>Crystallography Open Database</i>
CP IV	Cimento Portland pozolânico
CP V-ARI	Cimento Portland de alta resistência inicial
CPII	Cimento Portland composto
CPIII	Cimento Portland de alto forno
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
DRX	Difração de raios x
EDS	Espectroscopia por dispersão de energia
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
Fck	Resistência característica à compressão
FEG	<i>Field Emission Gun</i>
Fe_2O_3	Óxido de ferro
FRX	Espectrometria de fluorescência de raios X
ISO	Organização Internacional de Normalização
kg	Quilograma
kN	Quilonewton
LAMIR	Laboratório de Análises de Minerais e Rochas
LBTEC	Laboratório de Tecnologia Construtiva
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MgO	Óxido de magnésio
mm	Milímetros
MME	Ministério de Minas e Energia
MPa	Megapascal
pH	Potencial hidrogeniônico
RS	Resistente a sulfatos
SEM	<i>Scanning electron microscope</i>
SiO_2	Sílica, dióxido de silício
SO_3	Trióxido de enxofre

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVO GERAL	15
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	A UTILIZAÇÃO DE ARGAMASSAS NA CONSTRUÇÃO CIVIL	16
2.1.1	Tipos de argamassas	16
2.1.2	Cimento.....	17
2.1.2.1	Tipos de cimentos Portland	19
2.1.2.2	Hidratação do cimento Portland	21
2.1.2.3	Área superficial.....	24
2.1.3	Água para utilização em argamassas	25
2.1.4	Adições minerais	26
2.2	CLASSIFICAÇÃO DAS ROCHAS	26
2.2.1	Pó de rocha	28
2.3	INFLUÊNCIA DE PÓS DE ROCHAS EM ARGAMASSAS	28
2.3.1	Propriedades mecânicas.....	29
2.3.2	Efeito fíler.....	29
2.3.3	Atividade pozolânica	30
3	MATERIAIS E MÉTODOS	31
3.1	MATERIAIS.....	31
3.1.1	Cimento.....	31
3.1.2	Agregado miúdo	31
3.1.3	Água para preparação de argamassa.....	31
3.1.4	Adições minerais	32
3.2	MÉTODOS	33
3.2.1	Caracterização dos materiais	33
3.2.2	Análise granulométrica.....	34
3.2.3	Substituições por pós de rochas.....	35
3.2.4	Dosagem da argamassa.....	37
3.2.5	Consistência da argamassa fresca.....	38
3.2.6	Preparação dos corpos de prova	40
3.2.6.1	Execução do ensaio.....	40
3.2.7	Resistência à compressão axial e resistência à tração na flexão.....	41

3.2.8	Análises estatísticas dos dados	42
3.2.9	Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia por dispersão de energia (EDS)	43
3.2.10	Difração de raios X (DRX).....	44
3.2.10.1	Análise de Rietveld.....	44
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	46
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	46
4.1.1	Pós de rocha e cimento	46
4.1.1.1	Classificação dos pós de rocha	50
4.1.1.2	Difração de raios X das rochas	53
4.1.2	Agregados	58
4.2	ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA	60
4.3	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL	63
4.4	RESISTENCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO.....	67
4.5	MICROSCOPIA ELETRÔNICA POR VARREDURA DAS ARGAMASSAS ...	70
5	CONCLUSÕES.....	75
6	REFERÊNCIAS.....	77

1 INTRODUÇÃO

A argamassa, material versátil utilizado na construção civil, desempenha um papel crucial em diversas aplicações. Na produção de argamassa, o aglomerante é misturado com agregado miúdo e água, formando uma mistura que, ao endurecer, cria uma matriz sólida e resistente. Sua ampla utilização na construção é atribuída à sua capacidade de aderência que proporciona uma união sólida entre materiais como tijolos, blocos e revestimentos, enquanto sua coesão preenche espaços vazios, conferindo estabilidade estrutural.

O cimento Portland é um dos aglomerantes mais utilizados nesse tipo de mistura. Conforme dados apresentados pelo Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC), no ano de 2022 foram consumidos 62,8 milhões de toneladas no setor da construção civil no Brasil, e para o ano de 2050 a produção brasileira deve atingir valores acima de 116 milhões de toneladas ao ano.

Contudo, segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) vinculada ao Ministério de Minas e Energia (MME), a produção de cimento consome grandes quantidades de combustíveis em seu ciclo de produção, principalmente de origem fóssil para a produção do clínquer. O processo de clínquerização é responsável por 40 % da emissão específica da indústria do cimento, sendo que aproximadamente 50 % referem-se ao processo produtivo, cerca de 5 % ao transporte e os outros 5 % ao uso da eletricidade (WBCSD, 2002). Assim, a produção de cimento tem impactos ambientais, liberando toneladas de gases poluentes durante todo o processo do setor, incluindo o dióxido de carbono (CO₂), um dos principais gases do efeito estufa. Estima-se que a indústria do cimento contribua com cerca de 5 % das emissões antrópicas de CO₂ lançadas anualmente na atmosfera (SCHERER, 2023).

A utilização de materiais e subprodutos de outras atividades como substitutos do clínquer, ou mesmo do cimento Portland, nas misturas é uma prática adotada pela indústria e por pesquisadores. Essa abordagem contribui significativamente para a redução das emissões e do consumo de combustíveis, além de representar uma solução ambientalmente responsável para subprodutos de outros processos produtivos e para a preservação de recursos naturais não renováveis (SIQUEIRA, 2020).

O pó de brita é um subproduto do processo de beneficiamento de agregados naturais, obtido por meio da fragmentação de rochas maiores por equipamentos mecânicos. Devido ao seu baixo valor comercial e às poucas aplicações tradicionais, esse material frequentemente

acaba sendo descartado de forma inadequada, ocupando espaço nas pedreiras e causando impactos ambientais negativos.

A reincorporação desse material ao ciclo produtivo prolonga sua vida útil e previne os impactos ambientais decorrentes do descarte inadequado. Além disso, sua utilização como adição mineral na substituição parcial do cimento Portland ou do clínquer na fabricação de cimento contribui para a redução das emissões de poluentes na indústria cimenteira. Isso ocorre porque a produção de clínquer é a principal fonte de CO₂ nesse processo, e sua substituição por adições minerais permite mitigar esses impactos, tornando a construção mais sustentável.

Neste contexto, o presente estudo tem como objetivo avaliar o impacto da substituição parcial do cimento Portland por resíduos do processo de britagem nas propriedades de trabalhabilidade e nas resistências da argamassa endurecida, tanto à compressão axial quanto à tração na flexão. A pesquisa visa identificar materiais alternativos que possam ser utilizados como adições minerais, assegurando que sua incorporação não comprometa a integridade estrutural da mistura. Além disso, espera-se que essa substituição contribua para a redução do consumo de cimento, a mitigação das emissões de CO₂ associadas à sua produção e o aprimoramento da trabalhabilidade, sem prejudicar as propriedades mecânicas da argamassa.

1.1 OBJETIVO GERAL

Avaliação das propriedades das argamassas produzidas com substituição parcial do cimento Portland por resíduos do processo de britagem.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Estabeleceram-se os seguintes objetivos específicos, para atingir o objetivo geral:

- a) Análise das características físicas e químicas dos resíduos provenientes de três locais distintos;
- b) Avaliação do impacto da substituição nos parâmetros de espalhamento, percentual de substituição e origem dos materiais;
- c) Investigação das propriedades mecânicas de resistência à compressão e à tração em argamassas com substituição parcial de cimento;
- d) Análise da microestrutura das argamassas com substituição de cimento, com foco nas alterações causadas pelos resíduos;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste Capítulo, será apresentada uma revisão bibliográfica sobre as características e propriedades da mistura e componentes das argamassas, com o objetivo de analisar as principais contribuições da literatura existente para o entendimento do tema em questão. O entendimento detalhado desses aspectos é fundamental para analisar e discutir os resultados que serão apresentados mais adiante neste trabalho.

2.1 A UTILIZAÇÃO DE ARGAMASSAS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

A argamassa desempenha um papel crucial em construções que envolvem pedras, tijolos ou blocos cerâmicos, atuando como agente de união entre essas diversas unidades de materiais. Além de sua função essencial de ligação, as argamassas desempenham um papel significativo no revestimento, proporcionando uma camada protetora que contribui para a preservação e durabilidade dos elementos construtivos (SANTIAGO, 2007).

Conforme delimitado por Lisboa, Alves e Melo (2017), a proporção dos componentes na mistura pode variar de acordo com o tipo de argamassa desejado e as condições específicas da obra. Esse compósito é um material que pode conter aditivos e adições minerais, sendo uma mistura homogênea formada por aglomerantes, agregado miúdo e água.

Para sua produção, é necessária a mistura desses materiais em proporções adequadas, e de forma ordenada, por um intervalo de tempo com equipamentos específicos. Sendo que essa produção pode ser feita no canteiro de obra ou o processo pode ser industrializado, em que o produto é adquirido pré-fabricado (BUENO, 2000).

2.1.1 Tipos de argamassas

A argamassa é um material utilizado amplamente na construção civil, com uma aplicação diversificada e sua classificação depende da sua composição, propriedades e aplicações específicas, resultando desse modo em diferentes tipos de argamassa com características técnicas variadas. As características diferentes desses materiais permitem dividi-las em relação a suas funções, como as argamassas de assentamento, revestimento, colantes e as de reparo e impermeabilização (LOPES, 2017).

Para a união de elementos de alvenaria, como tijolos e blocos, onde se faz necessário propriedades de trabalhabilidade, aderência e resistência à compressão, as argamassas de assentamento são as mais utilizadas. Esse tipo de mistura é normalmente composto por cimento,

cal e areia para atender as exigências necessárias para a execução dos sistemas construtivos de alvenaria. Já as argamassas de revestimento são outro tipo, recebem geralmente acabamento superficial, e são aplicadas para nivelar, preparar, proteger ou decorar superfícies. Também existem as argamassas colantes, essas argamassas devem possuir alta aderência e flexibilidade, visto que precisam suportar a movimentação que acaba ocorrendo entre o substrato e o revestimento por variações de temperatura ou umidade, são preparadas para fixar azulejos, cerâmicas e outros tipos de revestimentos. Por fim, as argamassas de reparo e impermeabilização são desenvolvidas e aplicadas para restaurar estruturas e reparar ou cuidar áreas expostas à umidade. Sua composição normalmente contém aditivos impermeabilizantes e componentes que favorecem as propriedades de resistência e durabilidade (LOPES, 2017).

2.1.2 Cimento

O cimento Portland é um tipo de cimento hidráulico, amplamente utilizado na construção civil, conhecido por sua capacidade de endurecer e ganhar resistência quando misturado com água. Sua principal característica é a ausência de água quimicamente combinada, em seu processo de produção em altas temperaturas. Ele desempenha um papel crucial na produção de concreto e argamassa, sendo o principal aglomerante utilizado em uma variedade de aplicações estruturais e de construção (LISBOA; ALVES; MELO, 2017).

A produção do cimento Portland envolve a moagem de uma mistura de calcário e argila, que é então aquecida a uma temperatura elevada em um forno rotativo. Esse processo, conhecido como clínquerização, resulta na formação de pequenos grãos de clínquer. O clínquer, após ser resfriado, é moído para obter o cimento Portland em pó (DORFMAN, 2003).

Os principais compostos do cimento Portland são o silicato tricálcico (C_3S), silicato dicálcico (C_2S), aluminato tricálcico (C_3A), ferroaluminato tetracálcico (C_4AF), apresentados no Quadro 1. Esses produtos mais complexos surgem basicamente da mistura de óxido de cálcio (CaO), alumina (Al_2O_3), sílica (SiO_2), óxido de ferro (Fe_2O_3), óxido de magnésio (MgO), trióxido de enxofre (SO_3), álcalis e algumas outras impurezas e substâncias menos significativas (NEVILLE, 2013).

Quadro 1 - Principais compostos do cimento Portland.

Composto	Composição em óxidos	Abreviatura
Silicato tricálcico	$3CaO.SiO_2$	C_3S
Silicato dicálcico	$2CaO.SiO_2$	C_2S
Aluminato tricálcico	$3CaO.Al_2O_3$	C_3A
Ferroaluminato tetracálcico	$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$	C_4AF

Fonte: Neville (2016).

De acordo com Bauer (2019), o cálculo para fins da determinação da composição potencial do cimento Portland, provem usualmente das reações propostas por R.H. Bogue, em 1947. O conjunto de reações das Equações (1 a 4) apresentado a seguir, estima estequiometricamente as porcentagens dos principais compostos da mistura.

Silicato tricálcico

$$C_3S = 4,071x(CaO) - 7,6x(SiO_2) - 6,718x(Al_2O_3) - 1,43x(Fe_2O_3) - 2,85x(SO_3) \quad (1)$$

Silicato dicálcico

$$C_2S = 2,867x(SiO_2) - 0,754(3Ca.SiO_2) \quad (2)$$

Aluminato tricálcico

$$C_3A = 2,65x(Al_2O_3) - 1,692x(Fe_2O_3) \quad (3)$$

Ferroaluminato tetracálcico

$$C_4AF = 3,04x(Fe_2O_3) \quad (4)$$

Para atender parâmetros mineralógicos e químicos da mistura que compõe a matéria-prima, existem limites específicos relacionados aos óxidos presentes nos cimentos Portland, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição do cimento Portland.

Óxido	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Álcalis	SO ₃
Teor (%)	60,0 – 67,0	17,0 – 25,0	3,0 – 8,0	0,5 – 6,0	0,1 – 4,0	0,2 – 1,3	1,0 – 3,0

Fonte: Neville (2013).

2.1.2.1 Tipos de cimentos Portland

Na indústria da construção civil, há uma grande variedade de tipos de cimento, cada um com composições e particularidades específicas. Para simplificar sua identificação e entendimento, os cimentos Portland são classificados com base em suas características (MORAIS, 2020). A norma ABNT NBR 16697 (2018) define que a identificação dos cimentos Portland é realizada mediante suas siglas, seguidas da indicação de sua classe de resistência, que pode ser 25, 32, 40 ou ARI (alta resistência inicial), e quando aplicável incorpora-se os sufixos RS e BC. O sufixo RS representa o cimento Portland resistente a sulfatos e o BC se refere ao cimento Portland de baixo calor de hidratação. As variações entre esses tipos ocorrem com base na relação entre clínquer, sulfatos de cálcio e adições (como escórias, pozolanas e materiais carbonáticos) incorporadas durante o processo de moagem, nas quais o clínquer e o sulfato de cálcio são comuns a todos, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Limites de composição do cimento Portland.

Designação normalizada	Sigla	Classe de resistência	Sufixo	Clinquer + Sulfatos de cálcio (% de massa)	Escória granulada de alto-forno (% de massa)	Material pozolânico (% de massa)	Material carbonático (% de massa)
Cimento Portland comum	CP I	25, 32 ou 40	RS ou BC	95 - 100	0 - 5	0 - 5	0 - 5
	CP I-S	25, 32 ou 40	RS ou BC	90 - 94	-	-	6 - 10
Cimento Portland composto com escória granulada de alto forno	CP II-E	25, 32 ou 40	RS ou BC	51 - 94	6 - 34	-	0 - 15
Cimento Portland composto com material pozolânico	CP II-Z	25, 32 ou 40	RS ou BC	71 - 94	-	6 - 14	0 - 15
Cimento Portland composto com material carbonático	CP II-F	25, 32 ou 40	RS ou BC	75 - 89	-	-	11 - 25
Cimento Portland de alto forno	CP III	25, 32 ou 40	RS ou BC	25 - 65	35 - 75	-	0 - 10
Cimento Portland pozolânico	CP IV	25, 32 ou 40	RS ou BC	45 - 85	-	15 - 50	0 - 10
Cimento Portland de alta resistência inicial	CP V ^a	ARI	RS ou BC	90 - 100	-	-	0 - 10
Cimento Portland branco Estrutural	CPB	25, 32 ou 40	RS ou BC	75 - 100	-	-	0 - 25
Cimento Portland branco - Não estrutural	CPB	-	-	50 - 74	-	-	26 - 50

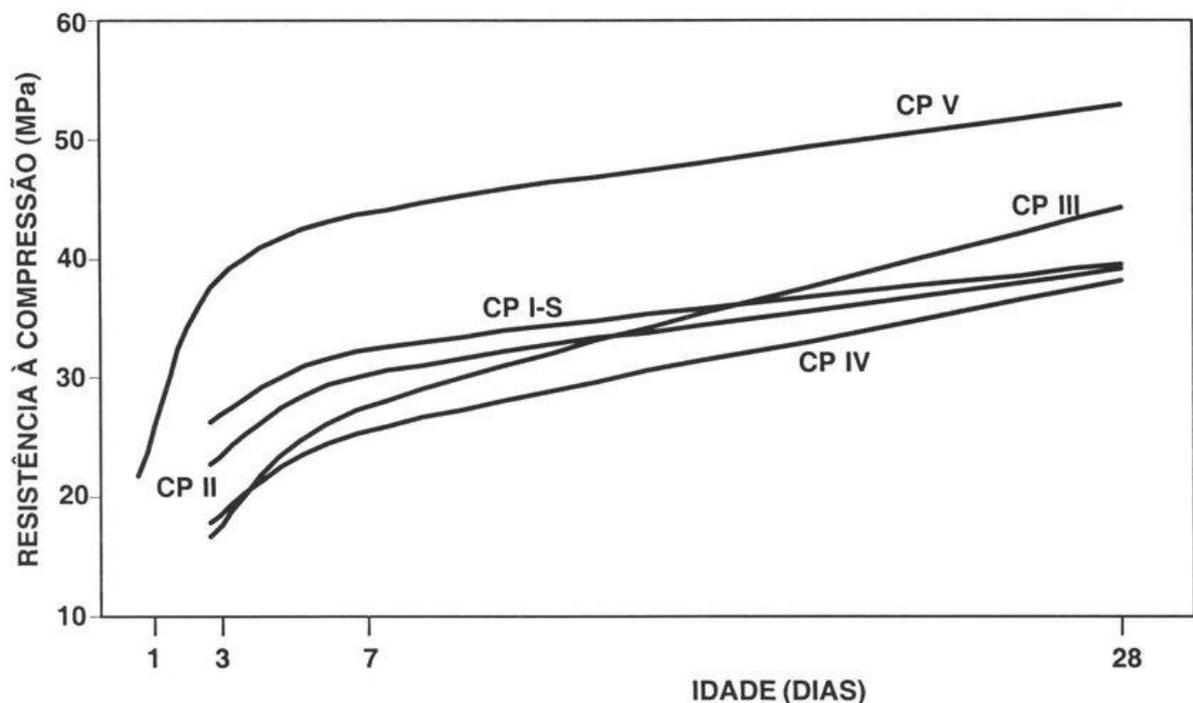
a - no caso de cimento Portland de alta resistência inicial resistente a sulfatos (CP V - ARI RS), podem ser adicionadas escórias

Fonte: ABNT NBR 16679 (2018).

A Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) apresenta que os tipos de cimento mais comuns comercializados e utilizados na construção civil incluem o cimento Portland composto (CPII), o cimento Portland de alto forno (CPIII), o Cimento Portland pozolânico (CP IV) e o cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI), cada um com suas próprias características e aplicações.

Com o conhecimento das reações e compostos presentes em cada tipo de cimento é possível ter a compreensão das características e aplicações de cada tipo de cimento, assim garantindo o desempenho adequado e durabilidade das estruturas construídas. A estrutura do material, e o arranjo de suas partículas permitem estipular um padrão para os diferentes tipos de cimento comercializados (MORAIS, 2020). Uma dessas características conhecidas, a depender do tipo do cimento e das incorporações adicionadas na mistura, é a resistência média à compressão. A resistência média à compressão é uma propriedade fundamental dos diferentes tipos de cimento, sendo influenciada pela composição e pelo processo de produção de cada tipo, o que permite prever o seu comportamento. Na Figura 1 é possível observar a evolução da resistência ao longo do tempo para cada tipo de cimento mais comumente utilizados.

Figura 1 - Resistência média dos tipos de cimento Portland.

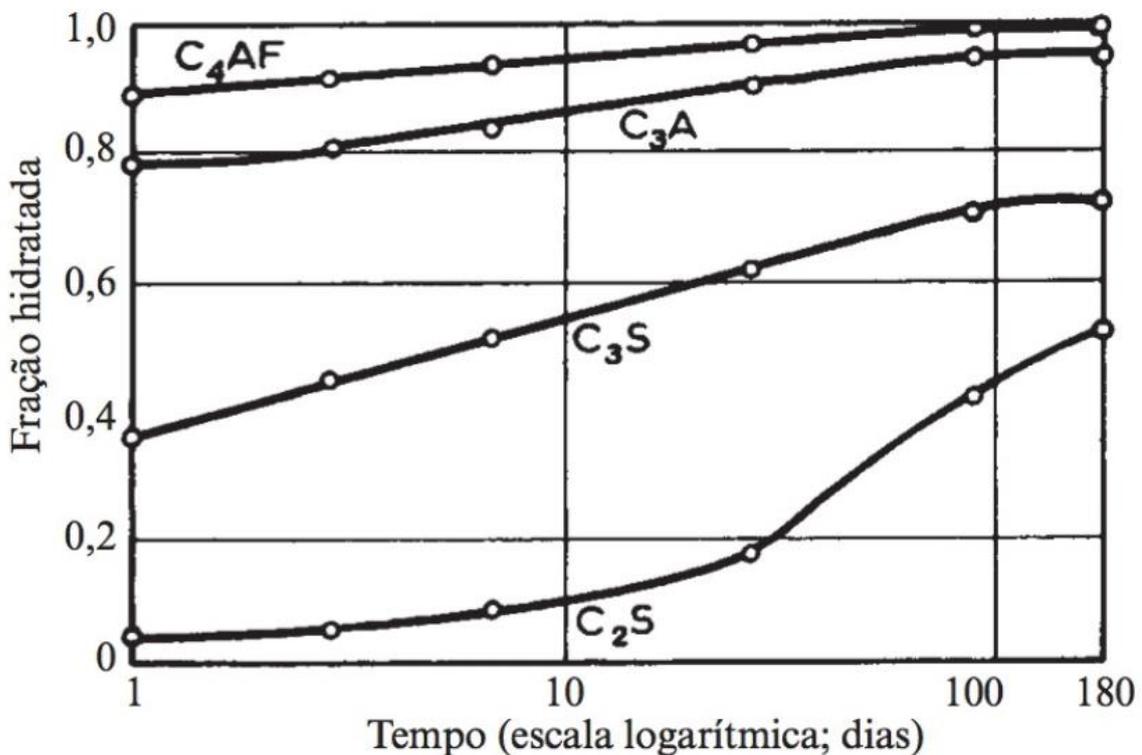


Fonte: Neville (2013).

2.1.2.2 Hidratação do cimento Portland

Para as diferentes aplicações no cimento na construção civil, é necessário que ocorra o processo de hidratação. Esse processo é a formação de um novo composto hidratado resultante da hidratação de um composto anídrico ao reagir com a água, no contexto das misturas de argamassas e concretos utilizados na construção civil esse composto anídrico é o cimento. Nesse processo ocorre uma sequência de reações químicas, influenciando uma à outra, em diferentes velocidades (Figura 2), resultando tanto mudanças químicas quanto físico-mecânicas no sistema, especialmente envolvendo o processo de cura e endurecimento (CASTRO, 2021).

Figura 2 - Velocidade de hidratação dos cimentos puros.



Fonte: Neville (2016).

A hidratação do cimento Portland é um processo complexo que envolve várias reações químicas simultâneas e sucessivas, ocorrendo de forma espontânea ao entrar em contato com a água, acompanhada pela liberação de calor. Esse progresso pode ser afetado por fatores como composição e granulometria do cimento, relação água/cimento, temperatura de cura e presença de misturas e/ou aditivos na pasta (ODLER, 2003).

Os silicatos de cálcio (C_2S e C_3S) são os principais compostos cimentícios, sendo o C_2S mais lento na hidratação que o C_3S . Quando se trata dos cimentos comumente comercializados,

esses silicatos contêm pequenos contaminantes de óxidos presentes no clínquer, que apresentam grande influência nas propriedades dos silicatos hidratados. As bibliografias apresentam para as impurezas do C_2S e C_3S as nomenclaturas de belita e alita, respectivamente (CASTRO, 2021).

Quando ocorre a hidratação desses silicatos são produzidos novos compostos químicos. A hidratação do C_3S produz o composto hidratado $C_3S_4H_4$, liberando cal na forma cristalina de $Ca(OH)_2$, já o C_2S apesar de se hidratar de forma similar gera menos cal na reação. Atualmente, os silicatos de cálcio hidratados são denominados C-S-H, anteriormente conhecidos como gel de tobermorita (CASTRO, 2021).

Costa (2009) descreve o mecanismo de hidratação do cimento como um processo complexo e ainda não completamente compreendido. No entanto, eles podem ser descritos simplificada em 5 etapas, conforme ilustrado na Figura 3. Na Etapa 1, nos instantes iniciais após a mistura há a reação da água com o aluminato tricálcico (C_3A) e o gesso (CS), resultando na formação de cristais de trissulfoaluminato de cálcio hidratado (AFt), bem como com o silicato tricálcico (C_3S), é produzido o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) em forma de gel amorfo e o hidróxido de cálcio (CH).

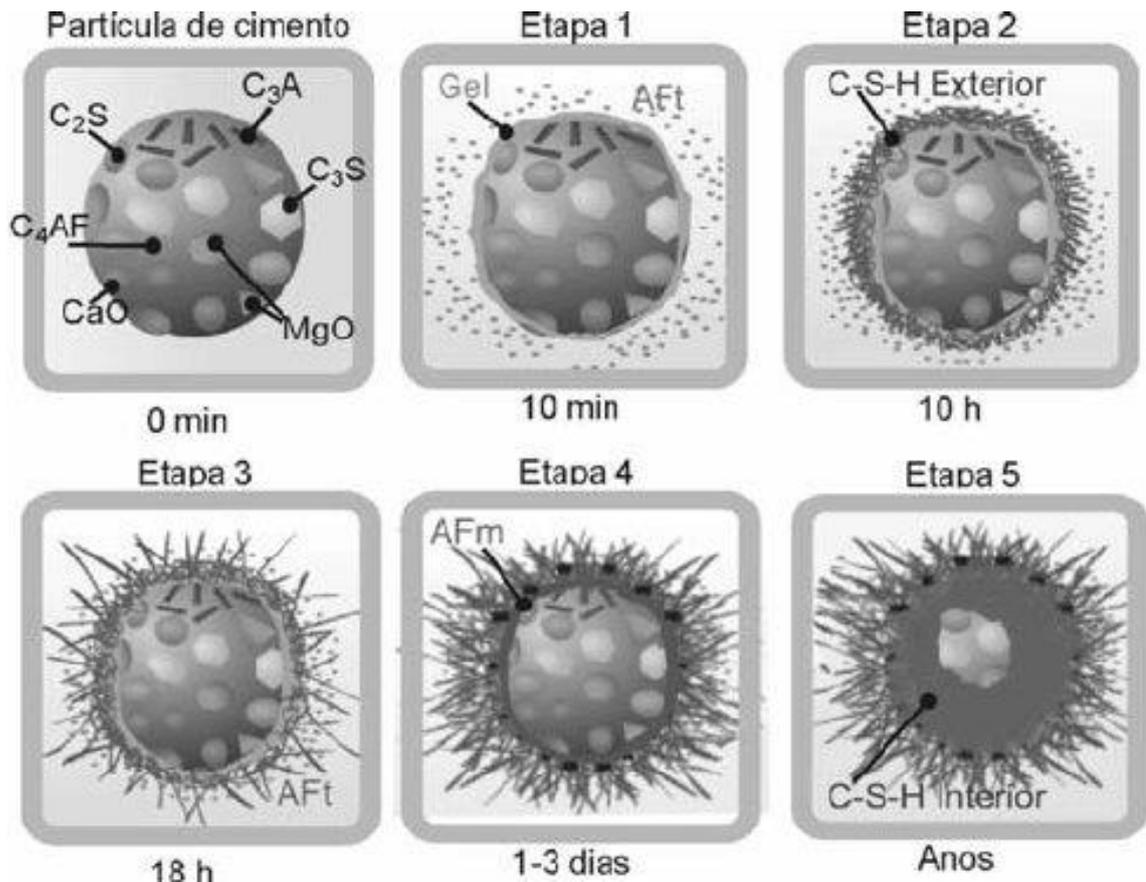
Em seguida na Etapa 2, prossegue a reação com os silicatos de cálcio (C_3S e C_2S), produzindo uma camada adicional de C-S-H na região circundante das partículas, conhecida como "C-S-H exterior". Posteriormente na Etapa 3, ocorre uma reação de hidratação secundária dos aluminatos de cálcio (C_3A e C_4AF), resultando na formação de longos compostos aciculares de trissulfoaluminato de cálcio hidratado (AFt). O C-S-H produzido nessa fase é denominado "interior", de morfologia homogênea, deposita-se dentro dos limites dos grãos originais. A hidratação continua a uma velocidade lenta, com formação progressiva de "C-S-H interior" e uma nova fase de aluminato, mono-sulfoaluminato de cálcio hidratado (AFm). Por fim, ao longo dos anos, as reações de hidratação continuam essencialmente formando mais "C-S-H interior" adicional (COSTA, 2009).

Na Etapa 4, o processo de hidratação continua de forma lenta, mas agora em um estado sólido. A formação de "C-S-H interior" se mantém, e o mono-sulfoaluminato de cálcio hidratado (AFm) continua a ser produzido. Essa etapa é caracterizada pela manutenção do processo de hidratação em uma taxa mais controlada e por um crescimento contínuo das fases de C-S-H interior.

Por fim, na Etapa 5, as reações de hidratação persistem por muitos anos, com um foco maior na formação adicional de "C-S-H interior". Ao contrário da Etapa 4, que é marcada pela

formação inicial e pelo crescimento contínuo do C-S-H interior e AFm, a Etapa 5 se concentra na formação contínua e estabilização da fase "C-S-H interior", resultando em uma melhora gradual na resistência ao longo do tempo. A principal diferença entre a Etapa 4 e a Etapa 5 é a continuidade e a estabilização da fase de "C-S-H interior", com um ritmo de hidratação mais lento e menos agressivo, permitindo o amadurecimento da estrutura do cimento ao longo de muitos anos.

Figura 3 - Etapas de hidratação de uma partícula de cimento.



Fonte: Costa (2009).

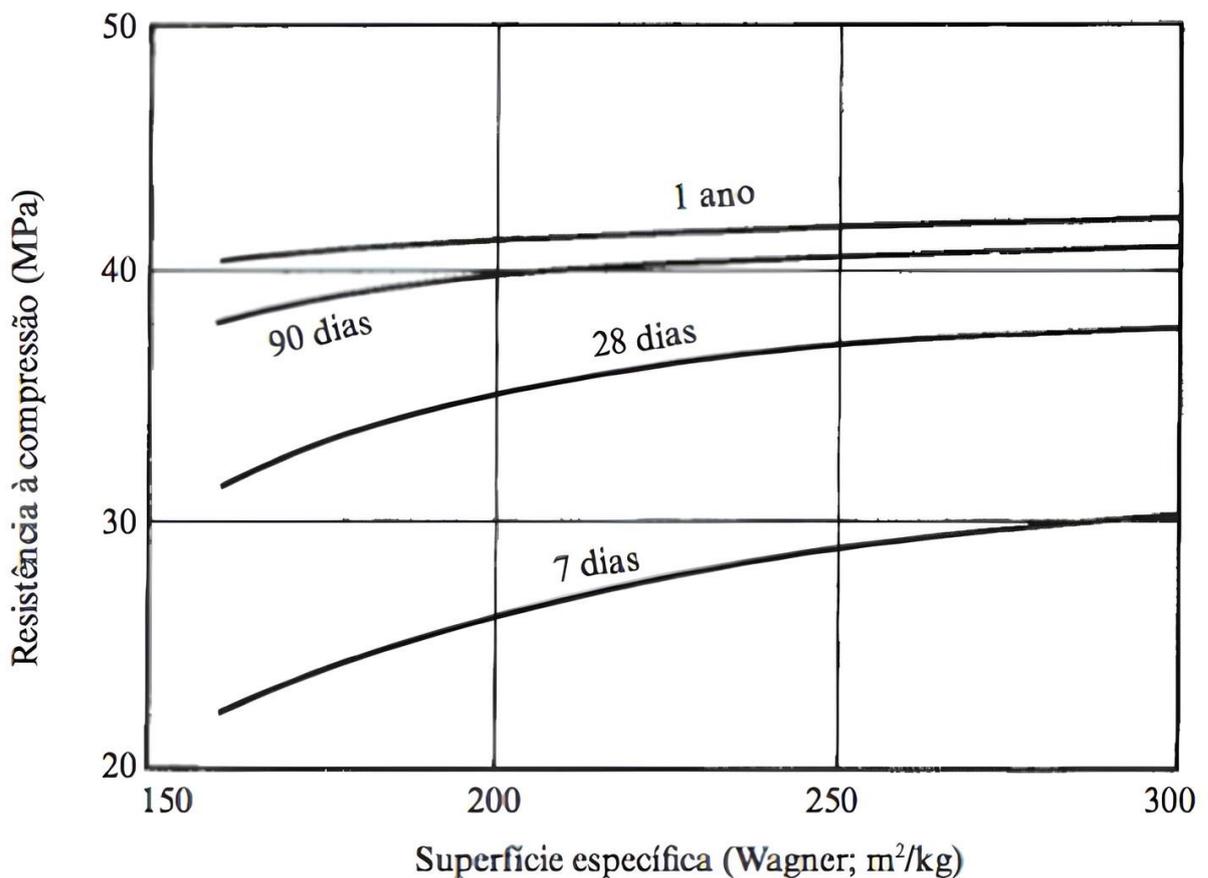
Essas etapas envolvem a interação de diferentes compostos como os silicatos e os aluminatos, suas dimensões de partículas apresentam variação, sendo a partícula de cimento em si de 0,001 a 0,090 mm, o C_3S de 0,025 a 0,065 mm, o C_2S de 0,020 a 0,040 mm, e o C_3A de 0,001 a 0,060 mm. Quando há uma quantidade adequada de água, a hidratação das partículas do cimento pode prosseguir até que todo o cimento original seja consumido. No entanto, em proporções reduzidas de água-cimento, a reação pode cessar devido à falta da quantidade suficiente de água necessária para o processo (ODLER, 2003).

2.1.2.3 Área superficial

A granulometria das adições minerais nas misturas de argamassa e concreto podem ser uma solução viável para mitigar fissuras e o uso de grandes quantidades de cimento, além do mais, podem vir a diminuir o uso de aditivos na mistura e apresentar ganhos de resistência, de acordo com Karimi, Yu e Brouwers (2018).

Na Figura 4 é possível ver o padrão que se forma ao diminuir o tamanho da superfície da partícula e comparar com os resultados obtidos com a resistência à compressão. Ressalta-se que apesar dos resultados o custo da moagem e o calor liberado na hidratação são alguns limitantes para a finura dos cimentos comerciais.

Figura 4 - Relação da resistência à compressão com a finura do cimento.



Fonte: Neville (2016).

O aumento da finura das partículas de cimento para valores menores que $1\ \mu\text{m}$ leva a maiores forças adesivas interparticulares, o que pode levar à aglomeração. A tendência tem sido a de cimentos mais finos ao longo do último século, o que se adequa bem aos cronogramas rápidos da indústria da construção. No entanto, algumas aplicações não requerem altas resistências iniciais e podem sofrer danos com essa mudança. A redução na umidade relativa

interna dos cimentos mais grossos é menor do que nos cimentos mais finos e geralmente produzem menos retração autógena, conforme Karimi, Yu e Brouwers (2018).

O controle da moagem do cimento Portland é padronizado pela norma ABNT NBR 16697 (2018), sendo que os tipos de cimentos Portland comercializados em território nacional devem estar de acordo com os requisitos físicos e mecânicos da Tabela 3, em função de seu tipo e classe.

Tabela 3 - Requisitos de finura do cimento Portland.

Sigla	Classe de resistência	Finura (resíduo na peneira 0,075 mm) %
CP I		
CP I-S	25	≤ 12,0 *
CP II-E	32	≤ 12,0 *
CP II-F	40	≤ 10,0 *
CP II-Z		
CP III	25	≤ 8,0
CP IV	32	≤ 8,0
	40	≤ 8,0
CP V	ARI	≤ 6,0
CPB	25	≤ 12,0 *
Não estrutural	32	≤ 12,0 *
	40	≤ 12,0 *
CPB Não estrutural	-	≤ 12,0 *

*Resíduo na peneira 0,045 mm

Fonte: Adaptado da norma ABNT NBR 16697 (2018).

Os valores de finuras que tratam a normativa para cada tipo de cimento Portland, devem ser realizados conforme as normas ABNT NBR 11579 (2013) e ABNT NBR 16372 (2015), a qual é dada pela porcentagem, em massa, retida na peneira de malha 0,075 mm (n° 200).

2.1.3 Água para utilização em argamassas

Conforme Pedroso (2009), a qualidade da água para amassamento desempenha um papel crucial no preparo de misturas a base de cimento, visto que, as argamassas e concretos possuem forte dependência dos materiais utilizados.

Dessa forma, a norma ABNT NBR 15900 (2001) estabelece os critérios necessários para que a água seja considerada adequada para esse processo. Ela não apenas define os requisitos mínimos de qualidade, mas também delinea os procedimentos de amostragem e os métodos para avaliação, garantindo a consistência e a confiabilidade do processo de construção. Os

requisitos tratados na normativa abrangem aspectos como a concentração de substâncias químicas, o pH, a turbidez e a presença de micro-organismos. É importante ressaltar que a água disponibilizada no abastecimento público, que está em conformidade com a Portaria nº 518 do Ministério da Saúde, é considerada adequada para uso na preparação de concretos e argamassas sem restrições. Essa norma comenta ainda que, águas contaminadas ou com impurezas podem comprometer as propriedades do material, afetando sua resistência, durabilidade e até mesmo sua aparência. Portanto, a seleção de uma fonte confiável de água é essencial para garantir a qualidade e a eficácia das misturas de concreto e argamassas em todas as etapas do processo construtivo.

2.1.4 Adições minerais

Conforme Neville (2013) o termo "adição" refere-se a materiais de origem mineral finamente moídos, frequentemente chamados de adições minerais. Segundo Mehta e Monteiro (2008) as adições podem ser definidas como todo o material que não são considerados agregados, cimento ou água, e que são adicionados imediatamente antes ou durante a mistura. É importante diferenciar "adições" de "aditivos", sendo este último usado para designar produtos químicos industrializados projetados para melhorar o desempenho ou atender requisitos técnicos específicos na produção de cimentos e concretos (NEVILLE, 2013).

A incorporação dessas adições no cimento Portland contribui para a diminuição do consumo de energia e custos de produção, além de mitigar impactos ambientais, como a redução da emissão de poluentes (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Esses benefícios são corroborados por estudos realizados por Dal Molin (2005), que destacam a presença de índices pozolânicos em algumas classes de adições minerais, especialmente em materiais silicosos e sílico-aluminosos. Essas substâncias, ao reagirem com o hidróxido de cálcio na presença de água, formam compostos com propriedades aglomerantes. Contudo, na ausência de água, sua capacidade aglomerante é reduzida ou inexistente, conforme estabelecido pela norma ABNT NBR 12653 (2014).

2.2 CLASSIFICAÇÃO DAS ROCHAS

A depender do processo de formação, as rochas podem ser classificadas e agrupadas como magmáticas, sedimentares e metamórficas, com subdivisões que consideram a composição mineralógica e química, estrutura cristalina, textura e granulação. Conforme Queiroz (2016), as rochas magmáticas resultam do processo de solidificação do magma. Esse

processo ocorre nas profundidades da crosta terrestre, onde o magma resfria e solidifica, resultando em diferentes tipos de rochas magmáticas. O grau de cristalinidade e a granulação dessas rochas dependem da taxa de resfriamento do magma, influenciando na textura final da rocha. Resfriamentos mais rápidos produzem texturas mais finas, enquanto resfriamentos mais lentos resultam em texturas mais grosseiras. As rochas magmáticas são classificadas principalmente com base em sua origem e características mineralógicas. Existem três grupos principais: rochas ígneas intrusivas, formadas por resfriamento lento abaixo da superfície; rochas ígneas extrusivas, resultantes de resfriamento rápido na superfície; e rochas ígneas subvulcânicas, formadas por resfriamento intermediário. A classificação mineralógica inclui granito e riolito (rochas ácidas), diorito e andesito (rochas intermediárias), e basalto e gabro (rochas básicas). A quantidade de sílica (SiO_2) é um critério chave, categorizando as rochas como ácidas ($\text{SiO}_2 > 65 \%$), intermediárias ($55 \% < \text{SiO}_2 < 65 \%$) ou básicas ($\text{SiO}_2 < 55 \%$).

Nesse contexto, destaca-se a Província Paraná-Etendeka, composta por extensas áreas de rochas vulcânicas e intrusivas. Essa província é predominantemente formada por basaltos e basaltos andesíticos (97,5 %), com uma menor proporção de rochas vulcânicas ácidas (2,5 %). A maior parte de sua extensão está localizada na América do Sul, no Brasil concentra-se nas regiões Sul e Sudeste, enquanto uma porção menor se encontra no sudoeste do continente africano, abrangendo áreas da Namíbia e de Angola. Estratigraficamente, essas rochas pertencem ao Grupo Serra Geral (GSG), também denominado Formação Serra Geral (FSG). Essa formação é subdividida em quatro unidades principais: Formação Esmeralda, Formação Palmas, Formação Vale do Sol e Formação Torres (ROSSETTI *et al.*, 2018).

As rochas sedimentares são aquelas que se formam a partir da estratificação de rochas pré-existentes, ocorrendo em locais distintos dos originais devido à influência de intempéries ou outros mecanismos de transporte, conforme explicado por Queiroz (2016). Materiais como areia, argila, cascalho e silte são considerados sedimentares, sendo comumente diferenciados pelo tamanho das partículas. Conforme estabelecido pela norma ABNT NBR 6502 (2015), essas partículas podem variar de 0,002 mm em argilas, até 60 mm em cascalhos. Por outro lado, as rochas metamórficas surgem a partir de modificações na estrutura cristalina de rochas já existentes, que podem ser magmáticas, sedimentares ou metamórficas. Essas alterações resultam da interação de fatores como reatividade química, temperatura, pressão e cinética (QUEIROZ, 2016).

2.2.1 Pó de rocha

O pó de rocha é um subproduto de britamento de pedras ou de processos industriais, por ser um subproduto sem valor comercial expressivo é tratado como rejeito, sendo que na maioria das vezes seu descarte não recebe os cuidados adequados. Essa falta de cuidado com o descarte final desses produtos gera problemas de relevância ambiental.

Para evitar o descarte inadequado desses resíduos é necessário estudar formas de aplicações sustentáveis e, uma dessas formas seria a utilização na construção civil para redução dos impactos ambientais. O meio acadêmico já percebeu essas necessidades, e trabalhos como os de Campos (2015), Siqueira e Hentges (2020), e Nunes (2020), são exemplos de pesquisas que demonstram a viabilidade do processo.

A ABNT NBR 7225 (1993) define o pó de rocha como um material com dimensão nominal inferior a 0,075 mm, podendo ser classificado como fíler. Segundo a norma, o fíler consiste em pó de pedra ou outros materiais minerais inertes, sendo utilizado principalmente como aditivo ou enchimento em diversas aplicações.

2.3 INFLUÊNCIA DE PÓS DE ROCHAS EM ARGAMASSAS

O potencial dos resíduos de rochas em melhorar as propriedades mecânicas e durabilidade das argamassas, além de contribuir para a sustentabilidade do setor da construção civil são aspectos que fazem com que eles sejam estudados em pesquisas acadêmicas. Esses resíduos podem trazer grandes benefícios a depender da sua origem e composição mineralógica, as quais, vão influenciar diretamente nas propriedades finais das argamassas. De modo geral, os pós de rocha aparecem em estudos atuando como substituto parcial do aglomerante ou dos agregados, os resíduos de rochas podem contribuir para a redução da porosidade, melhora da trabalhabilidade e o aumento da resistência mecânica das argamassas.

Tal desempenho pode ser atribuído ao efeito fíler, decorrente do preenchimento dos vazios entre as partículas, e, em alguns casos, à atividade pozolânica de resíduos de rochas com composição mineralógica reativa, que contribuem para a formação contínua de compostos cimentantes, promovendo o aumento da resistência mecânica das argamassas ao longo do tempo (SOUZA, 2011).

2.3.1 Propriedades mecânicas

As adições minerais são materiais baratos, normalmente resíduos de um processo primário, e podem contribuir positivamente com as misturas de concreto e argamassas. A incorporação desses materiais em princípio provoca mudanças químicas e físicas nas estruturas dos compósitos produzidos (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Os trabalhos realizados com substituição parcial das adições minerais para o cimento Portland, apresentaram ganho de trabalhabilidade do concreto e argamassa fresca. Entretanto, o ganho de trabalhabilidade está relacionado com o teor de adição mineral na mistura, teores mais elevados apresentam tendência de diminuir a trabalhabilidade do concreto e da argamassa (RIBEIRO *et al.*, 2018).

As adições minerais costumam proporcionar às misturas de cimento baixo calor de hidratação, gerando efeito retardador sobre as resistências iniciais, e melhora da resistência à fissuração térmica. Contribuem também para o aumento da resistência mecânica, impermeabilidade, e na redução das inhomogeneidades microestruturais (TAYLOR, 1997). Conforme Silva (2016), as pequenas partículas dos pós de rochas aumentam o contato sólido-sólido, agindo como inibidor dos poros afetando a redução da porosidade da matriz significativamente, gerando compósitos mais coesos em comparação aos sem adições. Essa melhora de coesão influencia consideravelmente na tendência à redução de segregação e exsudação, além de melhorar as propriedades de resistência à compressão, tração e ataques químicos (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Embora, segundo Silva (2016), o aumento significativo da resistência à compressão e à tração ocorre apenas quando as reações pozolânicas das adições minerais se manifestam, o que tende a acontecer em idades mais avançadas.

2.3.2 Efeito fíler

O fíler é uma adição mineral composta por partículas finamente divididas que, embora geralmente inertes, podem apresentar alguma reatividade na pasta de cimento. As referências que apresentam estudos sobre o efeito da incorporação do fíler nas misturas de cimento demonstram que esse incremento estimula as reações de hidratação do cimento. Essas reações acabam gerando um aumento nos resultados de resistência mecânica (RAHHAL; TALERO, 2005).

Gonçalves (2000) demonstrou que, ao incorporar resíduos moídos de granito no concreto, ocorre um ganho médio de resistência à compressão. É importante salientar que a

eficiência de uma adição mineral pode variar conforme a quantidade utilizada, as condições de cura e a composição química, mineralógica e granulométrica do material. As características mineralógicas e granulométricas são especialmente relevantes para determinar o comportamento das adições no concreto (RAHHAL; TALERO, 2005). A melhora na resistência mecânica, deve-se a tendência das partículas em se alojar nos vazios da estrutura, gerando um refinamento nas estruturas de poros e conduzindo a um melhor empacotamento. Essa melhora na estrutura do compósito é válida se ocorrer reação pozolânica (GONÇALVES, 2005).

2.3.3 Atividade pozolânica

Os materiais pozolânicos para a criação de misturas com propriedades ligantes remonta a tempos antigos, com os romanos utilizando-os amplamente em suas grandes construções, como aquedutos e edifícios públicos. Eles combinavam pozolana, cal e água para formar uma mistura durável e resistente. A pozolana utilizada, composta de cinzas vulcânicas, desencadeava uma reação química ao ser misturada com os outros materiais, resultando em um material extremamente resistente. Esse composto, conhecido como “opus caementicium”, revolucionou a construção e a arquitetura na Roma Antiga, permitindo a edificação de estruturas duradouras (PEDROSO, 2009).

Com o avanço da engenharia e das tecnologias ao longo das décadas, novos estudos demonstraram que diversos tipos de resíduos e materiais apresentam comportamento pozolânico, como a escória de alto-forno, o metacaulim, a sílica ativa, a cinza de casca de arroz e as cinzas volantes (MEHTA; MONTEIRO, 2014). A adição ou substituição de materiais pozolânicos em relação ao cimento Portland tende a aumentar a durabilidade de argamassas e concretos, desde que sejam utilizados em proporções adequadas e submetidos a uma cura apropriada. A formação desses compostos ocorre devido à reação do hidróxido de cálcio (CH), que é produzido durante a hidratação do cimento, com a pozolana. Esses compostos resultantes são essenciais para o desenvolvimento das propriedades estruturais e funcionais das misturas, como o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), aluminato de cálcio hidratado (C-A-H) e podendo gerar etringita (AFt). As partículas que não reagem com os produtos de hidratação e compostos formados durante o processo de reação, preenchem os grandes vazios capilares e refinam a estrutura dos poros (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste Capítulo são descritos os materiais e as metodologias empregadas na pesquisa, serão apresentadas as particularidades dos materiais investigados, assim como os parâmetros considerados na seleção de cada um deles para a respectiva análise.

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Cimento

O cimento utilizado no presente trabalho foi fabricado pela empresa Votorantim Cimentos S.A. na unidade Pinheiro Machado no Estado do Rio Grande do Sul, vendido em sacos de 25 kg. A classe desse cimento é a CP IV – cimento Portland pozolânico, sendo que para atender essa classificação ele deve atingir uma resistência característica à compressão (F_{ck}) ≥ 32 MPa aos 28 dias hidratação.

A opção por esse tipo de cimento foi fundamentada nas características específicas do grupo de cimentos Portland, que proporcionam a redução da permeabilidade e da porosidade capilar nos compósitos. A escolha do fabricante foi motivada pela ampla disponibilidade desse produto no mercado local. Outro fator relevante foi a facilidade de aquisição, que se alinha com a necessidade de uma solução prática e acessível. Apesar da alta quantidade de filer já presente neste cimento, o estudo visa explorar a possibilidade de aumentar ainda mais a concentração dessas adições, com o intuito de aprimorar as propriedades do material.

3.1.2 Agregado miúdo

A areia utilizada nas misturas de argamassa foi selecionada e incorporada conforme as especificações técnicas para garantir a consistência e a reprodutibilidade das amostras, seguindo as recomendações da norma ABNT NBR NM 248 (2003). O material passou por um processo de peneiramento prévio para controlar a distribuição granulométrica, o que possibilita um controle mais preciso nas propriedades da argamassa.

3.1.3 Água para preparação de argamassa

Durante o processo de preparação das amostras de argamassa, optou-se pelo uso da água proveniente da rede pública de abastecimento, a qual segundo o Serviço Autônomo Municipal de Água e Esgoto de Caxias do Sul/RS (SAMAE), atende rigorosamente aos parâmetros de

potabilidade determinados pelo Ministério da Saúde e pela Secretaria Estadual da Saúde, atendendo aos critérios de potabilidade estabelecidos pela Portaria GM/MS Nº 888, BRASIL (2021).

3.1.4 Adições minerais

Foram selecionados três tipos distintos de materiais, provenientes de subprodutos residuais de processos industriais de britagem de rochas da Formação Serra Geral (FSG), para serem utilizados como adições minerais. Para fins de identificação e distinção entre as amostras analisadas, será adotada uma nomenclatura padronizada. Considerando que os materiais correspondem a pós de rocha, cada amostra será designada pela sigla "PR", seguida de um número de controle específico, facilitando a organização e o acompanhamento dos resultados ao longo do estudo (Figura 5).

Os materiais selecionados foram considerados substitutos do cimento Portland nas misturas de argamassa. Os pós de rocha foram caracterizados por meio de um processo de peneiramento, sendo escolhido apenas o material que passou por uma peneira com malha de abertura nominal de 75 μm .

Esses resíduos originam-se do acúmulo de partículas finamente divididas nos moedores de rocha durante o processo de britagem. Coletados diretamente do local de armazenamento nas pedreiras, os materiais são provenientes de rochas ígneas vulcânicas, situadas no Estado do Rio Grande do Sul. O material foi armazenado em bombonas plásticas de 50 litros, atóxicas, revestidas internamente com saco plástico, tampadas com tampa removível e etiquetadas de acordo com a ABNT NBR 10007 (2004).

Figura 5 – Amostras de pós de rochas PR53 (esquerda), PR68 (centro) e PR51 (direita).



Fonte: O Autor (2024).

3.2 MÉTODOS

Esta seção apresenta detalhadamente a metodologia adotada para a realização deste trabalho, e a Figura 6 ilustra o procedimento experimental seguido no desenvolvimento deste projeto de pesquisa.

Figura 6 - Fluxograma do procedimento experimental.



Fonte: O Autor (2024).

3.2.1 Caracterização dos materiais

A determinação da massa específica do aglomerante (cimento) e das adições minerais (pó de rocha) foi conduzida em conformidade com os procedimentos da normativa ABNT NBR NM 23 (2020). Para o módulo de finura, utilizaram-se os procedimentos descritos na normativa ABNT NBR 11579 (2013). A verificação de seus estados físicos e coloração ocorreu de forma visual, e para a determinação da composição granulométrica seguiram-se os parâmetros estabelecidos na ABNT NBR NM 248 (2003).

Na determinação da composição química dos pós de rochas estudados, utilizou-se um espectrômetro PANalytical Axios Max, no instituto de pesquisa LAMIR (Laboratório de Análises de Minerais e Rochas) da Universidade Federal do Paraná (UFPR), realizando a análise química quantitativa total por espectrometria de fluorescência de raios X (FRX). O

cimento foi analisado no mesmo laboratório, utilizando uma análise química semiquantitativa, sendo que para ambos os ensaios realizados levou-se em consideração a perda ao fogo. O agregado miúdo (areia) foi peneirado previamente em uma peneira com tela de aço inoxidável 304, com tela de malha 8 (abertura de 2,72 mm), com o objetivo retirar materiais grosseiros. Em seguida, foi classificado com base em sua massa específica, granulometria e módulo de finura a partir dos procedimentos estabelecidos nas normas ABNT NBR NM 52 (2009) e ABNT NBR NM 248 (2003).

3.2.2 Análise granulométrica

A caracterização da granulometria dos materiais foi determinada pelo ensaio de peneiramento conforme a normativa ABNT NBR NM 248 (2003), utilizando o agitador eletromagnético da marca Produtest, por um tempo de 20 minutos. Para a realização do procedimento no agregado miúdo, areia natural, as peneiras da série normal com abertura de 9,5 mm, 4,75 mm, 2,36 mm, 1,18 mm, 0,60 mm, 0,30 mm, 0,15 mm e a peneira com abertura de 6,3 mm da série intermediárias foram utilizadas. Com o objetivo de obter uma amostra de finos mais homogênea e compatível com a granulometria desejada para o estudo, selecionaram-se os pós de rochas que passaram pela peneira de 0,075 mm, devido à semelhança com a granulometria do cimento. Dessa forma, no ensaio granulométrico do cimento e dos pós de rochas foram usadas as peneiras com abertura de 0,075 mm, 0,063 mm, 0,045 mm e 0,038 mm.

As curvas granulométricas da areia permitem determinar o coeficiente de não uniformidade (C_u) e o coeficiente de curvatura (C_c). O coeficiente de não uniformidade (C_u), descrito na Equação 5, é utilizado para avaliar a variação granulométrica do solo. Quanto mais uniforme for a granulometria, mais semelhantes em tamanho serão as partículas que compõem o solo. Já o coeficiente de curvatura (C_c), descrito na Equação 6, indica a uniformidade e a distribuição dos tamanhos de partículas em uma amostra. Um solo quando bem graduado tem coeficiente de curvatura entre 1 e 3, sendo que os materiais com boa graduação apresentam uma distribuição equilibrada dos tamanhos das partículas (CAPUTO, 2007).

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{30}} \quad (5)$$

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \times D_{30}} \quad (6)$$

Utilizando os diâmetros das peneiras e as frações mássicas retidas, é possível calcular o diâmetro médio das partículas dos pós. Esse cálculo é realizado por meio do diâmetro médio de Sauter, conforme descrito na Equação 7.

$$d_s = \frac{1}{\sum x_i/D_i} \quad (7)$$

O diâmetro médio de Sauter (D32), também chamado de diâmetro médio superficial (d_s), destaca-se como um dos mais relevantes entre os diâmetros médios. Ele está diretamente associado à relação entre a área superficial e o volume, além de estar conectado à fração volumétrica da fase dispersa (CRAIG, 2007).

3.2.3 Substituições por pós de rochas

A substituição parcial do cimento por adições minerais modifica a estrutura das misturas, e a definição da melhor porcentagem depende de diversos fatores. Em situações em que não há compreensão clara dos parâmetros de teores ideais, uma opção seria realizar ensaios variando as porcentagens nas misturas, o que se torna pouco produtivo. Dessa forma, recorre-se à literatura científica para identificar padrões de dosagem utilizados por autores relevantes para área de estudo. No Quadro 2 são apresentados estudos que abordam o tema, relacionando com as substituições de adições utilizadas.

Quadro 2 - Teores de substituições de cimento por resíduos de rochas

(continua)

Autor	Substituição (%)	Melhores resultados	Título do Trabalho	Objetivo do trabalho
APOLINÁRIO (2014)	5 %	10 %	Influência da adição do resíduo proveniente do corte de mármore e granito (RCMG) nas propriedades de argamassas de cimento Portland.	Avaliar o comportamento do resíduo de corte de mármore e granito quando adicionado às argamassas comuns de cimento Portland, mistas (cimento e cal) e industrializadas.
	10 %			
	15 %			
ARUNTAS (2010)	3 %	10 %	Utilization of waste marble dust as an additive in cement production	Investigar a usabilidade do pó de mármore residual como um aditivo na produção de cimento composto e determinar suas propriedades de desempenho em função da adição de pó de mármore residual.
	5 %			
	8 %			
	10 %			

(conclusão)

Autor	Substituição (%)	Melhores resultados	Título do Trabalho	Objetivo do trabalho
MATTA (2013)	5 %	10 %	Efeitos da adição do resíduo de corte de mármore e granito (RCMG) no desempenho de argamassas de cimento Portland no estado endurecido	Verificar o efeito da adição do resíduo de corte de mármore e granito nas principais propriedades das argamassas de cimento Portland no estado endurecido.
	10 %			
	15 %			
NOBREGA (2014)	5 %	15 %	Caracterização do resíduo de pó de pedra ornamental adicionado à argamassa em substituição parcial ao cimento	Avaliar a incorporação dos resíduos provenientes de rochas ornamentais em argamassas de revestimento, objetivando manter ou melhorar as propriedades das argamassas.
	10 %			
	15 %			
	20 %			
	30 %			
	50 %			
RIBEIRO (2021)	8 %	8 %	Influência de adições minerais na elevação da temperatura de concretos massa de elevada resistência à compressão	Verificar a influência da temperatura nas reações das adições minerais nas misturas de concreto.
	10 %			
	12 %			
	14 %			
SANTOS, APOLINÁRIO, RIBEIRO (2013)	5 %	5 %	Influência da adição do resíduo de corte de mármore e granito (RCMG) na reologia das argamassas.	Avaliar a viabilidade técnica do uso do resíduo de corte de mármore e adição a argamassas de cimento Portland, observando se sua adição pode comprometer seu comportamento reológico.
	10 %			
	15 %			
SINGH, SRIVASTAVA, BHUNIA (2017)	10 %	15 %	An investigation on effect of partial replacement of cement by waste marble slurry"	Efeitos da pasta de mármore no processo de hidratação, propriedades do concreto fresco e endurecido e propriedades de durabilidade.
	15 %			
	20 %			
	25 %			
VARDHAN (2015)	10 %	10 %	Mechanical properties and microstructural analysis of cement mortar incorporating marble powder as partial replacement of cement	Investigar a possibilidade de utilização do pó de mármore como substituição parcial do cimento.
	20 %			
	30 %			
	40 %			
	50 %			

Fonte: O Autor (2024).

A literatura demonstra que as porcentagens de pós de rocha adotadas como parâmetros de pesquisa para modificações das misturas com cimento variam conforme o autor, podendo apresentar substituições entre 3 % e 50 % em relação ao aglomerante. No entanto, ao analisar os melhores resultados gerados com as incorporações, é possível observar uma tendência das porcentagens de 5 %, 10 % e 15 % se destacarem, quando comparadas com as demais porcentagens utilizadas nos estudos.

3.2.4 Dosagem da argamassa

A mistura preparada consiste em uma argamassa de cimento, adotando o traço 1:3, ou seja, para cada 1 kg de cimento, são adicionados 3 kg de agregado total, além das incorporações parciais de pós de rochas na massa de cimento. Esse traço foi escolhido por utilizar exclusivamente o aglomerante (cimento) e o agregado miúdo (areia), evitando a interferência de outros materiais nas análises. Com a incorporação dos pós de rocha na massa de cimento, a nomenclatura das argamassas será definida de acordo com o tipo e o teor de pó de rocha adicionado, conforme especificado na Tabela 4.

Tabela 4 - Identificação conforme a adição mineral, dos tipos de argamassas.

Mistura	Teor de substituição da massa de cimento	Identificação das amostras após mistura
CPIV	0	REF
CPIV	05 %	CPR51 05 %
+ PR51	10 %	CPR51 10 %
	15 %	CPR51 15 %
CPIV	05 %	CPR53 05 %
+ PR53	10 %	CPR53 10 %
	15 %	CPR53 15 %
CPIV	05 %	CPR68 05 %
+ PR68	10 %	CPR68 10 %
	15 %	CPR68 15 %

Fonte: O Autor (2024).

Para todas as misturas de argamassa, foi utilizado 100 % da massa do agregado miúdo, ajustando a quantidade de cimento com substituições de 5 %, 10 % e 15 % pelos pós de rocha. As proporções em massa de cada material nas misturas de argamassa estão apresentadas na Tabela 5. A relação água/cimento adotada foi de 0,6, considerando a fração substituída de cimento no cálculo. Para o dimensionamento da massa total, levou-se em conta a capacidade máxima da argamassadeira, limitada a 7 kg.

Tabela 5 - Dimensionamento do traço das argamassas.

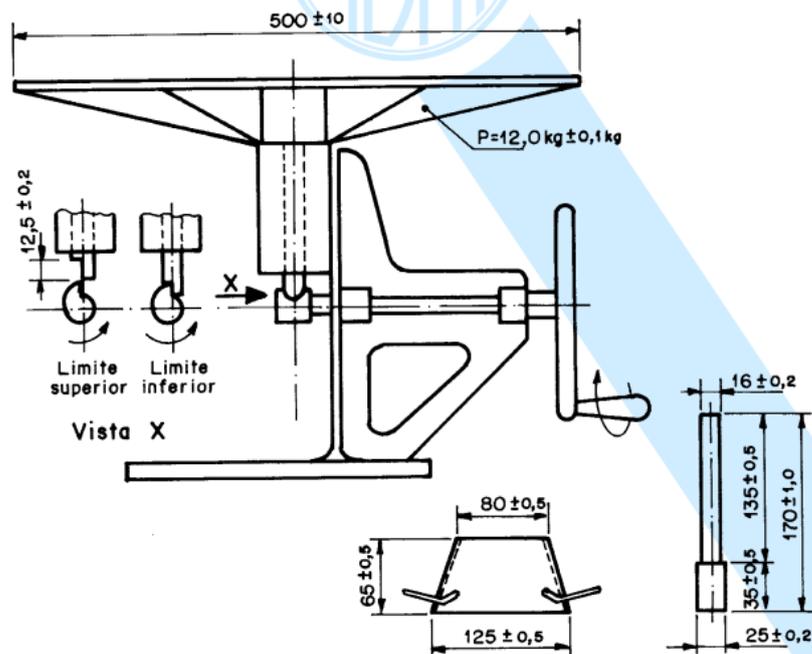
Identificação da amostra	Tipo de Argamassa	Cimento (kg)	Pó de rocha (kg)	Areia (kg)	Água (kg)
1	REF	1,25	0	3,75	0,75
2	CPR68 05 %	1,1875	0,0625	3,75	0,75
3	CPR68 10 %	1,125	0,125	3,75	0,75
4	CPR68 15 %	1,0625	0,1875	3,75	0,75
5	CPR53 05 %	1,1875	0,0625	3,75	0,75
6	CPR53 10 %	1,125	0,125	3,75	0,75
7	CPR53 15 %	1,0625	0,1875	3,75	0,75
8	CPR51 05 %	1,1875	0,0625	3,75	0,75
9	CPR51 10 %	1,125	0,125	3,75	0,75
10	CPR51 15 %	1,0625	0,1875	3,75	0,75

Fonte: O Autor (2024).

3.2.5 Consistência da argamassa fresca

A determinação do índice de consistência da argamassa para caracterização das misturas foi realizada de acordo com os procedimentos da norma ABNT NBR 13276 (2016). Sendo que antes de iniciar a execução dos procedimentos foi realizada a limpeza da mesa para índice de consistência e do molde troncônico com um pano limpo, apresentado na Figura 7.

Figura 7 - Aparelho para determinação da consistência da argamassa normal.



Fonte: ABNT NBR 7215 (2019).

Para esse ensaio a argamassa foi preparada e misturada conforme as diretrizes estabelecidas na normativa ABNT NBR 16541 (2016). Logo após a preparação da argamassa, o molde troncônico foi posicionado centralizado sobre a mesa para índice de consistência e adicionou-se três camadas sucessivas, aplicando em cada uma delas golpes com o soquete para distribuí-las uniformemente, respectivamente, quinze, dez e cinco golpes.

Em seguida, com uma régua metálica realizou-se o processo de rasamento da argamassa, rente à borda do molde troncônico, e após foi retirado o molde verticalmente resultando na Figura 8. Na próxima etapa foi acionada a manivela da mesa para índice de consistência 30 vezes em 30 segundos de maneira uniforme, fazendo com que a mesa subisse e caísse uniformemente.

Figura 8 - Etapa após retirada do molde troncônico.



Fonte: O Autor (2024).

Com o auxílio de uma régua metálica mediu-se o espalhamento da argamassa três vezes, em pontos distintos ao longo do perímetro de espalhamento (Figura 9). O processo foi repetido para cada amostra de estudo, sendo registrados três valores para cada.

Figura 9 - Espalhamento da amostra de argamassa.

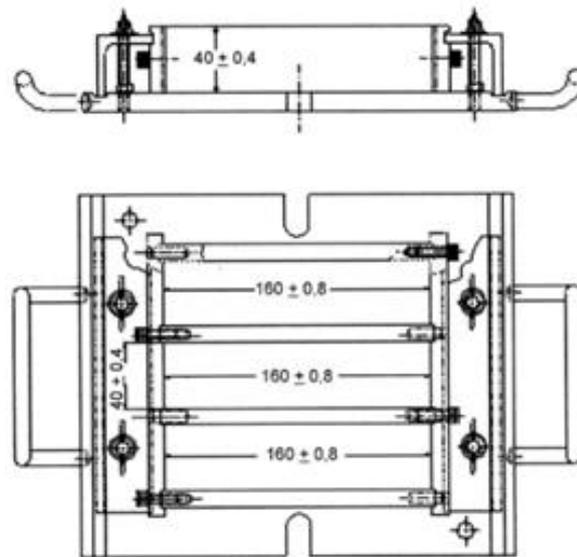


Fonte: O Autor (2024).

3.2.6 Preparação dos corpos de prova

Para determinar a moldagem dos corpos de prova de argamassa foram utilizados os procedimentos conforme a norma ABNT NBR 13279 (2005). Os corpos de prova das amostras de argamassa foram moldados em moldes prismáticos compostos por três compartimentos com dimensões de 40 x 40 x 160 mm, conforma ilustrado na Figura 10.

Figura 10 - Equipamento para moldagem dos corpos de prova.



Fonte: ABNT NBR 13279 (2005).

Antes de se iniciar a fabricação dos corpos de prova de argamassa, foi aplicado óleo desmoldante no equipamento, e o excesso foi retirado com papel absorvente limpo e seco.

3.2.6.1 Execução do ensaio

Foram moldados três corpos de prova prismáticos, por idade, com a argamassa recém-preparada. A relação das idades de rompimento das amostras de argamassas com a porcentagem e tipo de pó de rocha estão representadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Relação de amostras preparadas em dias.

Adição Mineral	5 %	10 %	15 %	5 %	10 %	15 %	5 %	10 %	15 %	0 %
TAG:	CPR68	CPR53	CPR51	CPR68	CPR53	CPR51	CPR68	CPR53	CPR51	REF
07 D	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
14 D	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
28 D	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3

Fonte: O Autor (2024).

Para preparação dos prismas de argamassa, os moldes prismáticos foram colocados sobre a mesa de adensamento e devidamente fixados à mesa. Em seguida, em duas camadas foi preenchido cada compartimento do molde. Para a primeira camada, o preenchimento foi realizado até a metade do prisma, seguido de 30 quedas na mesa de adensamento, aplicadas à razão de uma queda por segundo. Introduziu-se a segunda camada uniformemente e foi repetido o processo de 30 quedas por segundo com o auxílio da mesa de adensamento.

Com o processo de moldagem dos corpos de prova finalizado, foi rasada a parte superior dos corpos de prova com auxílio de régua metálica, e foram guardados em temperatura controlada para desforma em 48 horas. As amostras foram desmoldadas depois desse período, sendo identificadas e armazenadas em tanques com solução aquosa saturada de hidróxido de cálcio, estando a temperatura controlada em 23 ± 2 °C até a retirada nas idades desejadas para realização dos ensaios.

3.2.7 Resistência à compressão axial e resistência à tração na flexão

Os ensaios de resistência à compressão axial e resistência à tração na flexão, foram realizados, no Laboratório de Tecnologia Construtiva – LBTEC da Universidade de Caxias do Sul (UCS). O equipamento utilizado é da marca EMIC, modelo PC200L, com capacidade nominal de 300 kN. A calibragem se deu somente para aumento da força, conforme a norma NBR ISO 7500-1, usando um equipamento de verificação calibrado de acordo com a norma NBR ISO 376.

Os ensaios foram realizados aos 7, 14 e 28 dias, seguindo as tolerâncias de tempo estabelecidas para o momento da ruptura, de acordo com a idade dos corpos de prova, descrito na norma ABNT NBR 13279 (2005).

Para o ensaio à tração na flexão foi utilizada a prensa hidráulica descrita anteriormente. Os corpos de provas prismáticos com dimensões de 40 x 40 x 160 mm quando atingiram suas idades para rompimento, foram posicionados em um dispositivo de carga com dois suportes de aço em forma de roletes, com distância entre si de aproximadamente 100 mm, e no centro, entre os dois roletes de suporte, um terceiro rolete de aço de mesmo comprimento, sendo aplicado uma carga de (50 ± 10) N/s até a ruptura do corpo de prova. A Equação 8 apresenta o cálculo para a resistência à tração na flexão (ABNT NBR 13279, 2005).

$$R_f = \frac{1,5 * F_f * L}{40^3} \quad (8)$$

Onde:

- R_f é a resistência à tração na flexão, em megapascals;
 F_f é a carga aplicada verticalmente no centro do prisma, em newtons;
 L é a distância entre os suportes, em milímetros.

Após partida a amostra prismática, na realização do ensaio de tração na flexão, é gerado os corpos de prova cúbicos com dimensões de 40 x 40 x 40 mm que serão submetidos a uma carga axial de compressão. Sendo que o prato superior do dispositivo deve ser capaz de se alinhar livremente no momento do contato com a argamassa e, durante a aplicação da carga, a posição relativa dos pratos inferior e superior deve permanecer inalterada. Sendo aplicado uma carga de (500 ± 50) N/s até a ruptura do corpo de prova. Na Equação 9 é apresentada a expressão para obter a resistência à compressão axial (ABNT NBR 13279, 2005).

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (9)$$

Onde:

- R_c é a resistência à compressão, em megapascals;
 F_c é a carga máxima aplicada, em newtons;

3.2.8 Análises estatísticas dos dados

A estatística desempenha um papel fundamental na organização e interpretação de grandes volumes de dados, permitindo identificar padrões e tendências. Para análises mais aprofundadas, utilizam-se testes de hipótese, como a ANOVA, que avalia diferenças entre médias populacionais, considerando os efeitos de variáveis independentes sobre variáveis dependentes. Desenvolvida por Ronald Fisher, a ANOVA é amplamente reconhecida como uma ferramenta estatística eficaz e versátil, aplicável a diversos cenários de pesquisa, sendo sua versão mais simples, a de fator único, frequentemente empregada em análises introdutórias podendo ser executada no *software* Microsoft Excel (SILVA; SANTOS; BELLO, 2022).

A ANOVA opera comparando as médias de três ou mais grupos para identificar diferenças estatisticamente significativas. Sua interpretação baseia-se em cinco elementos principais: a Soma dos Quadrados (SQ), que mede a variabilidade entre os grupos (SQ entre) e dentro dos grupos (SQ dentro); os graus de liberdade (gl), que representam o número de valores independentes utilizados na análise; a Média dos Quadrados (MQ), calculada dividindo-se a SQ pelo respectivo gl; a estatística F, que corresponde à razão entre MQ entre e MQ dentro; e

o valor de P, que testa a hipótese nula de igualdade das médias. Quando o valor de P é inferior ao nível de significância adotado (tipicamente 0,05) ou quando a estatística F excede o valor crítico, rejeita-se a hipótese nula, evidenciando diferenças significativas entre as médias dos grupos analisados (MARCO; PAGLIA, 2009).

O teste de Tukey, ou HSD (Honest Significant Difference), complementa a ANOVA ao realizar comparações entre médias de forma precisa e prática. Este teste é reconhecido por sua exatidão, uma vez que mantém a taxa de erro para todas as comparações par a par exatamente igual a α , com intervalos de confiança correspondentes a $1-\alpha$, característica que o distingue de outros métodos de comparações múltiplas, frequentemente imprecisos. A aplicação do teste de Tukey depende de um resultado significativo no teste "F" da ANOVA, indicando diferenças entre os tratamentos que justifiquem comparações adicionais (SILVA; SANTOS; BELLO, 2022). O teste de Tukey utiliza a DMS (Diferença Mínima Significativa), conforme Equação 10, a partir do número de réplicas por tratamento (n), do valor tabelado q_α (obtido na Tabela do Teste de Tukey) e do Quadrado Médio do Erro (QMErro).

$$DMS = q_\alpha(g, N - g) \sqrt{\frac{QMErro}{n}} \quad (10)$$

As médias obtidas da ANOVA são comparadas duas a duas por meio do módulo das médias ($M1 - M2$). Para a análise a consideração $|M1 - M2| \geq DMS$, aceita-se a premissa de diferença significativa entre os valores, caso $DMS \geq |M1 - M2|$ rejeita-se a premissa (SILVA; SANTOS; BELLO, 2022).

3.2.9 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia por dispersão de energia (EDS)

A microestrutura das amostras de argamassa foi avaliada pela técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia por dispersão de energia (EDS). Para a captura das imagens, utilizou-se um microscópio eletrônico de varredura com fonte de emissão de campo (FEG-SEM Mira3, Tescan), operando no modo de dispersão de elétrons retroespalhados (BSE) a uma tensão de 15 kV. O equipamento está instalado no Laboratório Central de Microscopia (LCMIC) na Universidade de Caxias do Sul (UCS). Para essa análise, foram preparadas novas amostras seguindo os parâmetros normativos. As amostras foram cortadas em cubos de arestas de 10 mm, com serra circular de bancada, modelo TechCut 5 da marca Allied High Tech Products. A rotação máxima de trabalho utilizada foi de 4600 e a taxa de avanço máximo de 3,8 mm/m.. No mesmo dia, as amostras foram secas em estufa e, analisadas no dia

seguinte. Para melhorar a condutividade elétrica na superfície dos concretos, foi aplicada uma fina camada de ouro sobre as amostras. O processo de cura teve duração de 28 dias, abrangendo desde o preparo das amostras até a sua remoção da estufa no dia seguinte, para análise.

3.2.10 Difração de raios X (DRX)

A técnica DRX foi utilizada para a identificação das fases cristalinas nas amostras. As amostras em pó foram avaliadas em um difratômetro de raios X Shimadzu XRD 6000. Os parâmetros empregados para a análise foram: radiação de $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 1,54056 \text{ \AA}$), a 40 kV e 30 mA, varredura $10^\circ < 2\theta < 100^\circ$, passo de $0,05^\circ$ e tempo de aquisição de 2 s. As medidas foram realizadas a temperatura ambiente no LCMIC. A identificação das fases cristalinas e a determinação da linha de base (*background*) foram realizados com o auxílio do programa computacional X'Pert HighScore Plus desenvolvido pela Malvern Panalytical, com fichas de materiais cristalinos disponíveis no *International Center for Diffraction Data* (ICDD), por meio da comparação dos difratogramas (GOBBO, 2009).

A estimativa da cristalinidade das amostras foi realizada empregando a Equação 11. Conforme descrito por Oliveira (2017), a incógnita I_{obs} se refere à área total integrada e, $I_{background}$ se refere à área integrada da linha base associada à fração amorfa. A porcentagem de fase cristalina foi estimada conforme a Equação 11. A determinação das áreas I_{obs} e $I_{background}$ foi realizada com o auxílio do *software* Origin.

$$\text{Cristalinidade (\%)} = 100 * \frac{I_{obs} - I_{background}}{I_{obs}} \quad (11)$$

3.2.10.1 Análise de Rietveld

A quantificação proposta por Rietveld baseia-se na comparação entre o espectro experimental de uma amostra e espectros teóricos gerados a partir de combinações hipotéticas das fases presentes. Essa comparação é realizada ponto a ponto ao longo do difratograma, e as discrepâncias observadas são ajustadas por meio do método dos mínimos quadrados, permitindo a identificação e quantificação das fases cristalinas. O método dos mínimos quadrados é uma abordagem matemática empregada para ajustar modelos teóricos aos dados experimentais, minimizando as diferenças entre os valores observados e os calculados. Se tratando de sistemas polifásicos, modelos estruturais apropriados para cada fase identificada devem ser inseridos (GOBBO, 2009).

O refinamento dos resultados é aferido por meio de índices de concordâncias, que são ferramentas essenciais para quantificar as diferenças entre perfis experimentais e calculados, sendo fundamentais para avaliar a qualidade do ajuste dos dados e validar os modelos aplicados. O R_{expected} é uma medida estatística que avalia o nível de ruído nos dados experimentais; valores menores desse índice indicam dados de maior qualidade, com menor interferência de ruído. Já o R_{profile} representa a diferença residual entre os perfis observados e calculados, refletindo diretamente o grau de desvio entre ambos. O *Weighted* R_{profile} (R_{wp}) aplica uma ponderação que dá maior ênfase a pontos de alta intensidade, como picos, e menor ênfase a pontos de baixa intensidade, como o fundo do gráfico. Para que o ajuste seja considerado adequado, o valor de R_{wp} deve ser inferior a 10. Outro parâmetro relevante é o *Goodness of Fit* (GOF), calculado pela relação entre o quadrado de R_{wp} e o quadrado de R_{expected} . Valores de GOF inferiores a 4 indicam um bom ajuste. Esses índices são indispensáveis para a análise refinada de dados, pois permitem avaliar a qualidade dos resultados, identificar inconsistências e aprimorar os modelos utilizados, garantindo maior confiabilidade nos estudos experimentais (SPEAKMAN, 2012).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste Capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos nos ensaios descritos no tópico anterior.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

4.1.1 Pós de rocha e cimento

Nesta seção, os pós de rochas, por serem incorporados como substitutos parciais do cimento, serão analisados em conjunto com o cimento para avaliar seu impacto nas propriedades da argamassa. Assim, o cimento e os pós de rochas foram caracterizados e analisados quanto às suas propriedades físicas e químicas.

A Tabela 7 apresenta as propriedades físicas dos materiais, em relação à sua massa específica, módulo de finura e dimensão máxima das partículas. Observa-se que, em relação à dimensão máxima, todos os materiais apresentaram o mesmo valor de 0,075 mm, tendo como referência o percentual acumulado retido, em massa, inferior a 5 % nas malhas das peneiras da série normal (ABNT NBR NM 248, 2003). Na comparação dos módulos de finura, o PR51 destacou-se com o maior valor, sendo 67,96 % superior ao do cimento. No entanto, apresentou a massa específica menor entre as amostras, ficando abaixo da do cimento. O PR68, por sua vez, obteve o menor módulo de finura, 8,74 % inferior ao cimento, sendo o menor valor entre todos os materiais analisados, além de possuir uma massa específica numericamente menor que a do cimento. O pó de rocha PR53 demonstrou a maior massa específica, com um módulo de finura 17,48 % superior ao cimento.

A amostra PR51 tem o maior diâmetro médio de Sauter, o que indica uma distribuição de partículas um pouco mais grosseira em comparação com o CP IV. Já a amostra PR68 apresentou o valor de 0,043 mm, próximo do valor do cimento. Observa-se uma tendência do aumento do diâmetro médio de Sauter conforme aumenta o módulo de finura.

Tabela 7 - Propriedades físicas dos pós de rocha e do cimento.

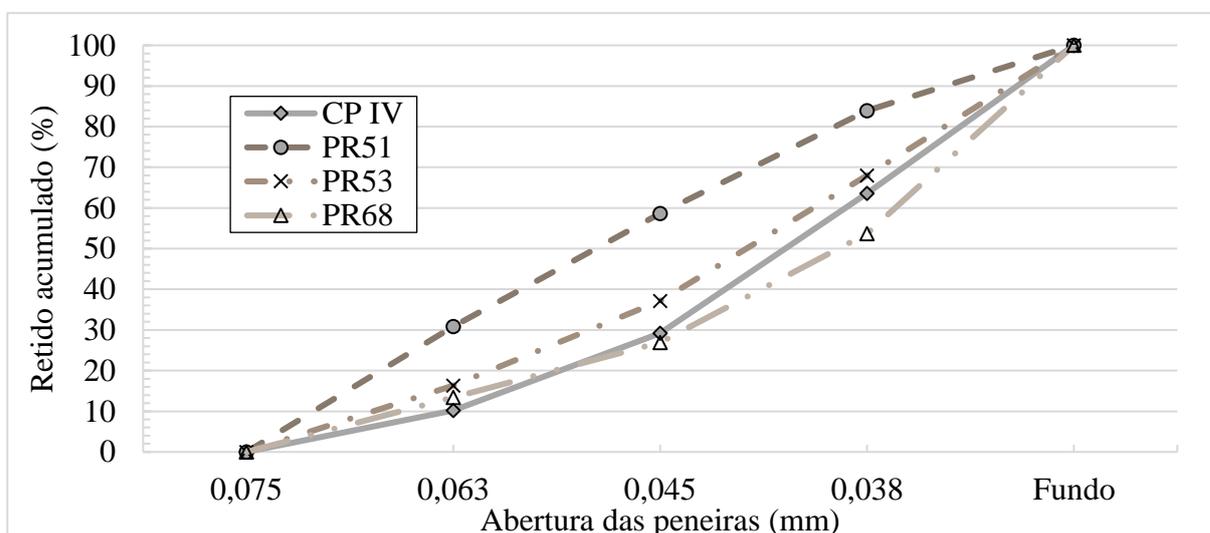
Classificação	Massa específica (g/cm ³)	Módulo de finura	Dimensão máxima (mm)	Diâmetro médio de Sauter (mm)
CP IV	2,67	1,03	0,075	0,044
PR51	2,35	1,73	0,075	0,050
PR53	2,82	1,21	0,075	0,045
PR68	2,46	0,94	0,075	0,043

Fonte: O Autor (2024).

A Figura 11 apresenta a distribuição granulométrica do cimento e dos pós de rochas estudados, os quais foram avaliados quanto à distribuição de partículas em função do diâmetro da abertura das peneiras. O pó de rocha PR68 e o PR53 apresentam comportamento granulométrico próximo dos valores obtidos para o CP IV, com destaque para a curva do PR68 que apresenta uma granulometria mais fina, evidenciada pela menor quantidade de material retido acumulado nas peneiras de maior abertura. O PR51 apresentou sua curva granulométrica mais afastada das demais, onde observa-se uma maior retenção acumulada nas peneiras com maiores aberturas, indicando a presença de partículas de maiores dimensões. Esse comportamento da PR51 justifica os valores obtidos, em comparação com as demais amostras, para o módulo de finura e o diâmetro médio de Sauter (Tabela 8).

Essa variação granulométrica entre os materiais analisados pode influenciar diretamente as características das argamassas, como trabalhabilidade, coesão e resistência mecânica. Conforme descrito por Jacoby e Pelisser (2015) materiais mais finos, como o PR68, tendem a melhorar a coesão e a reatividade, enquanto partículas mais grossas, como as do PR51, podem reduzir a trabalhabilidade e afetar o desempenho final das misturas.

Figura 11 - Distribuição granulométrica do aglomerante e dos pós de rochas.



Fonte: O Autor (2024).

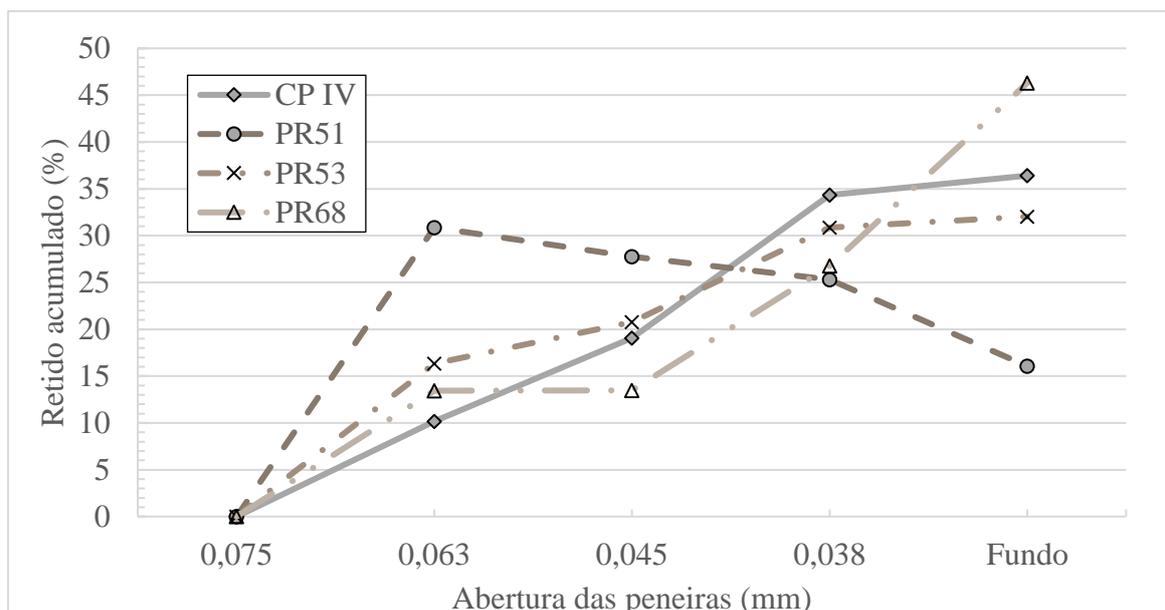
Considerando a norma ABNT NBR12653 (2014), que relata os parâmetros físicos da granulometria dos materiais para serem considerados materiais com potencial reatividade pozolânica, as amostras PR51 e PR53 não se enquadrariam na classificação, visto que o material retido na peneira 0,045 mm de ambas as amostras é superior a 20 %. No entanto, de acordo com a norma ASTM C618 (2023), que estabelece um limite máximo de 34 % de material retido na

peneira com abertura de 0,045 mm, esses dois pós podem ser considerados como potenciais materiais pozzolânicos.

A Figura 12 apresenta a fração retida em função do diâmetro médio das peneiras (μm) dos pós de rochas (PR51, PR53 e PR68) e do cimento CP IV. Analisando os dados gerados pelas curvas, observa-se diferenças na granulometria dos materiais. A curva do cimento CP IV apresenta uma distribuição mais uniforme e contínua, refletindo o maior controle granulométrico durante sua fabricação industrial. Enquanto, as curvas das amostras de pó de rocha (PR51, PR53 e PR68) revelam distribuições mais heterogêneas, com picos distintos que indicam concentração de partículas em tamanhos específicos de peneiras. A amostra PR51 apresenta um pico em partículas maiores, com diâmetros médios predominando na faixa de 65-70 μm . A PR53, por sua vez, demonstra uma distribuição intermediária, com maior proporção de partículas de tamanho médio. Já a PR68 concentra-se em partículas mais finas, com seu pico deslocado para a faixa de 40 - 45 μm , evidenciando maior similaridade com o cimento CP IV em termos de granulometria fina.

Conforme observado por outros autores, as diferenças na distribuição granulométrica sugerem que os pós de rochas podem impactar de maneira distinta as propriedades das argamassas. Partículas mais finas apresentam maior potencial de reatividade, favorecendo o preenchimento de vazios e aumento da densidade das matrizes cimentícias. Contudo, partículas maiores tendem a contribuir menos para a hidratação e o preenchimento dos vazios nas argamassas (JACOBY; PELISSER, 2015; ZHAO *et. al.* 2015).

Figura 12 - Distribuição de frequência dos pós de rochas e do cimento.



Fonte: O Autor (2024).

As composições químicas dos pós de rochas (PR68, PR53 e PR51), determinadas por fluorescência de raios X, são apresentadas na Tabela 8, onde também consta a perda ao fogo. A análise por FRX identificou os compostos presentes nos materiais, buscando principalmente a presença de CaO e SiO₂ em suas composições, sendo os principais responsáveis pela formação dos produtos de hidratação e apresentam os maiores teores na composição do cimento Portland. Conforme a norma ABNT NBR 13956-1 (2012) a adição de SiO₂ confere à argamassa propriedades exclusivas, influenciando tanto o desempenho mecânico quanto a durabilidade. A presença de sílica nas argamassas contribui para o aumento da trabalhabilidade no estado fresco, devido ao efeito fíler, que resulta de um melhor empacotamento das partículas. No caso da sílica ativa, seu papel é ainda mais significativo, pois desempenha uma função essencial no processo de hidratação do cimento Portland. Durante esse processo, a sílica ativa reage quimicamente com o hidróxido de cálcio liberado, promovendo a formação de compostos de silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Esses compostos são fundamentais para o aprimoramento das propriedades mecânicas e da durabilidade do concreto (NEVILLE, 2016).

Tabela 8 - Composição química dos pós de rochas.

		SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	SO ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	Na ₂ O	LOI
Massa (%)	CP IV	39,4	30,5	9,9	2,3	3,3	3,2	1,6	0,5	0,1	0,1	0,2	8,82
	PR68	68,8	2,19	12,9	-	5,01	0,72	4,59	0,55	0,11	0,21	2,71	1,14
	PR53	53,71	7,22	12,31	-	15,89	3,25	1,61	1,92	0,21	0,29	2,86	0,62
	PR51	50,99	9,31	13,12	-	14,06	6,31	1,17	1,72	0,20	0,16	1,93	0,58

Fonte: O Autor (2024).

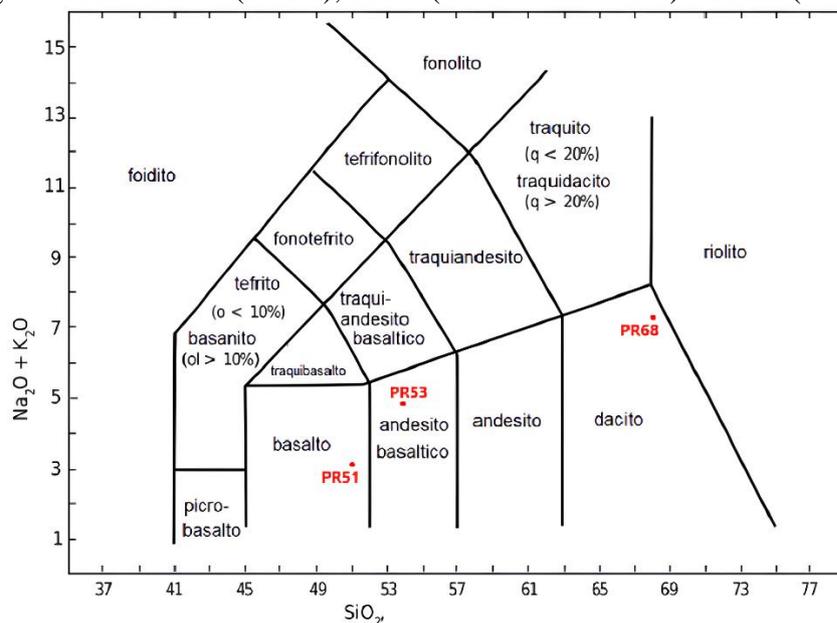
Considerando a composição da PR68, com uma maior concentração de sílica, pode-se justificar o menor módulo de finura observado. Estudos anteriores, como os de Antiohos *et al.* (2014), Raisi *et al.* (2018) e Betioli (2020), obtiveram resultados semelhantes, onde materiais com maior teor de sílica apresentaram menores valores de módulo de finura. Além disso, ressalta-se que, a partir da composição química dos materiais estudados, é possível identificar uma potencial atividade pozolânica, conforme os critérios estabelecidos pelas normas ASTM C618 (2023) e ABNT NBR 12653 (2014). De acordo com a norma ASTM C618 (2023), todos os pós de rochas atendem aos requisitos químicos e podem ser classificados como materiais com potencial pozolânico. Entretanto, segundo a norma ABNT NBR 12653 (2014), apenas o PR51 atende ao requisito mínimo de concentração de álcalis disponíveis em Na₂O. Apesar de todos os demais requisitos químicos serem atendidos pelas amostras PR53 e PR68, essas duas superam o limite máximo de 1,5 % estabelecido para esta normativa.

4.1.1.1 Classificação dos pós de rocha

O principal parâmetro da composição química que distingue as amostras é o teor de sílica (SiO_2), sendo que o PR68 apresenta o maior valor (68,8 %), caracterizando-se como uma rocha ácida, visto que a porcentagem de sílica é superior a 65 %. A PR53 que possui um teor de 53,71 % pode ser classificada por seu conteúdo de sílica como intermediária, estando entre 65 e 52 %. Já PR51, com o menor valor (50,99 %) representa uma rocha mais básica, uma vez que se enquadra em uma faixa de 45 a 52 % de sílica (MACHADO *et al.* 2009). No caso do óxido de cálcio (CaO), observa-se uma relação inversa com o teor de sílica. O PR51 apresenta o maior conteúdo de CaO (9,31 %) e o PR68 possui o menor teor de CaO (2,19 %). O teor de óxido de ferro (Fe_2O_3) é mais elevado no PR51 (14,06 %) e PR53 (15,89 %), sugerindo a predominância de minerais máficos. Já o PR68 apresenta o menor teor de Fe_2O_3 (5,01 %), reforçando sua classificação como uma rocha ácida.

Na Figura 13 é apresentada a análise de classificação das amostras realizada através do diagrama de “total-alkalis versus sílica” (TAS). Com o diagrama, desenvolvido por Le Bas em 1985, é possível classificar a rocha de origem com base na sua composição química, visto que, o diagrama relaciona a quantidade em percentual de massa (% m.) de SiO_2 em função da soma dos percentuais em massa de Na_2O e K_2O (teor alcalino). De acordo com a análise, verifica-se que o PR51 tem origem em um basalto, o PR53 é classificado como um andesito basáltico e o PR68 deriva de um dacito.

Figura 13 - Classificação dos pós de rochas quanto à rocha de origem de acordo com o diagrama TAS: PR68 (dacito), PR53 (basalto andesítico) e PR51 (basalto).

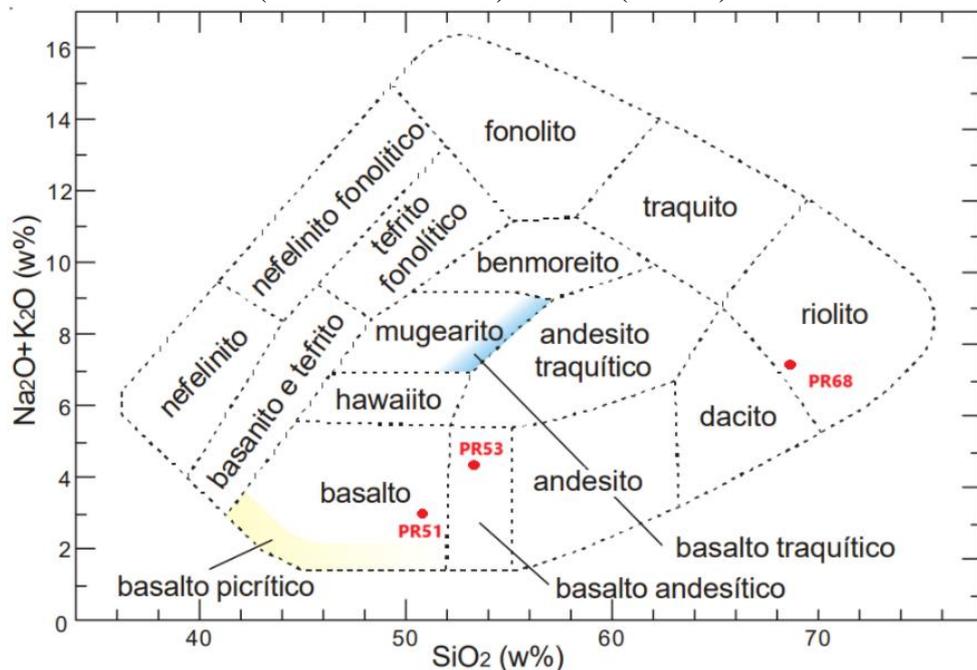


Fonte: Adaptado de Le Bas (1986).

Uma abordagem alternativa de classificação foi proposta anteriormente por Cox *et al.* (1979), utilizando a nomenclatura de classificação química de rochas ígneas baseada na composição química, conforme representado no diagrama de SiO₂ em relação a Na₂O + K₂O em porcentagem de massa (wt %), ilustrado na Figura 14. Com base nesse método, a amostra PR68 é classificada como um riolito, diferindo da classificação obtida pelo método de Le Bas (1985), que a designa como dacito. Por outro lado, os pós de rochas PR51 e PR53 foram classificados como basalto e basalto andesítico, respectivamente, mantendo a classificação indicada pelo método de Le Bas (1985).

Apesar da discrepância na classificação da amostra PR68, tanto os riolitos quanto os dacitos são quimicamente caracterizados como rochas ácidas, com base no teor de SiO₂, de acordo com os critérios de classificação química das rochas ígneas. Ambos pertencem à série cálcio-alkalina. De maneira semelhante, os basaltos e basaltos andesíticos também se inserem na série cálcio-alkalina, embora apresentem diferenças significativas em suas composições químicas (MOTOKI, 2004).

Figura 14 - Classificação geoquímica de rochas vulcânicas, com base no diagrama SiO₂ v.s. Na₂O + K₂O em porcentagem, segundo Cox *et al.* (1987): PR68 (riolito), PR53 (basalto andesítico) e PR51 (basalto).

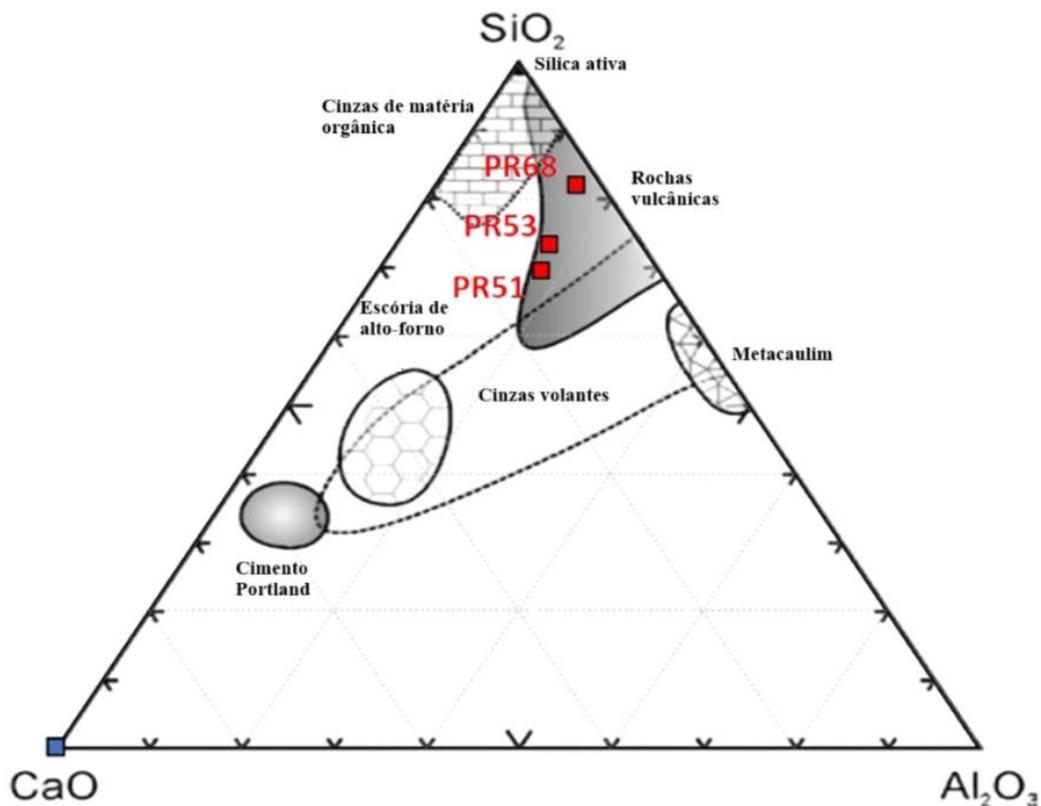


Fonte: Adaptado de Cox *et al.* (1987).

A Figura 15 apresenta um diagrama com a composição química e a variação característica dos principais grupos de materiais cimentícios suplementares amplamente

utilizados, mais conhecidos por seu termo em inglês, *Supplementary Cementitious Materials* (SCM). Os SCMs possuem propriedades hidráulicas semelhantes ao cimento Portland ou apresentam, no mínimo, comportamento pozolânico, o que significa que reagem quimicamente ao serem combinados com outros materiais hidráulicos. O diagrama concentra-se em um modelo ternário de variação composto por CaO, SiO₂ e Al₂O₃, desconsiderando os teores de álcalis, MgO e Fe₂O₃.

Figura 15 - Diagrama ternário de CaO-SiO₂-Al₂O₃ (baseado em % em peso) situando a constituição química dos principais grupos de materiais cimentícios suplementares (SCM).



Fonte: Adaptado de Glasser *et al.* (1987).

Por meio da análise do diagrama ternário, os pós de rochas foram classificados como provenientes de rochas vulcânicas, corroborando a classificação prévia obtida. Essa classificação está alinhada com as características da Formação Serra Geral, conhecida pela predominância de rochas vulcânicas, especialmente basaltos e basaltos andesíticos, nos quais os materiais PR51 e PR53 foram classificados, respectivamente. Já o material PR68, identificado como dacito pelo método de Le Bas (1985) e riolito pelo método de Cox *et al.* (1979), representa uma menor proporção de rochas vulcânicas ácidas presentes nessa formação. Essa análise reforça a consistência entre os métodos de classificação utilizados e as características geológicas da formação estudada.

4.1.1.2 Difração de raios X das rochas

Por meio de tabelas internacionais para cristalografia e a pesquisa aos dados fornecidos no *Crystallography Open Database* (COD) foram selecionados dados estruturais dos compostos presentes nos pós de rochas. O *Crystallography Open Database* (COD) tem sido uma plataforma essencial para a disponibilização de estruturas cristalinas, com contribuições significativas de diversos pesquisadores ao longo dos anos (GRAŽULIS *et al.* 2015; DOWNS; HALL-WALLACE, 2003; GRAŽULIS *et al.*, 2012; MERKYS *et al.*, 2016; QUIRÓS *et al.*, 2018; VAITKUS *et al.*, 2021; MERKYS *et al.*, 2023; VAITKUS *et al.*, 2023). Um resumo dos dados cristalográficos das estruturas utilizados no *software X'Pert High Score Plus* para identificação da composição mineralógica das amostras é apresentado na Tabela 9, sendo possível identificar os parâmetros de rede, sistema cristalino, grupo espacial e volume.

Tabela 9 - Características gerais das estruturas dos compostos utilizadas nas análises para os pós de rochas.

	Composto	Parâmetros de rede				Volume (Å ³)	Sistema cristalino	Grupo espacial
		a(Å)	b(Å)	c(Å)	β(°)			
PR51	Magnetita	8,36	8,36	8,36	90	586,06	Cúbico	Fd $\bar{3}m$
	Pigeonita	9,46	8,94	5,24	103,27	432,35	Monoclínico	P2 ₁ /c
	Augita	9,75	8,90	5,27	106,01	439,99	Monoclínico	C2/c
	Hematita	5,03	5,03	13,74	90	301,81	Trigonal	R3c
	Cristobalita	4,97	4,97	6,93	90	171,19	Tetragonal	P4 ₁ 2 ₁ 2
	Labradorita	7,10	7,59	7,65	100,60	334,67	Triclínico	P $\bar{1}$
	Goethita	4,60	9,95	3,02	90	138,62	Ortorrômboico	Pnma
	Quartzo	4,91	4,91	5,40	90	113,05	Trigonal	P3 ₁ 21
PR53	Sanidina	8,48	12,97	7,18	115,98	709,89	Monoclínico	C2/m
	Anortita	8,17	12,86	12,89	81,15	1336,34	Triclínico	P $\bar{1}$
	Sanidina	8,54	13,03	7,17	115,97	718,55	Monoclínico	C2/m
	Augita	9,69	8,84	5,27	106,97	432,53	Monoclínico	C2/c
	Hematita	5,03	5,03	13,74	90	301,81	Trigonal	R3c
	Albita	7,11	7,61	7,62	100,66	334,73	Triclínico	P $\bar{1}$
	Pigeonita	9,42	8,85	5,25	103,56	425,51	Monoclínico	C2/m
	Caulinita	5,14	7,35	8,98	89,75	329,79	Triclínico	P1
PR68	Quartzo	4,91	4,91	5,40	90	113,19	Triclínico	P1
	Anortita	7,10	7,59	7,65	100,58	334,81	Triclínico	P $\bar{1}$
	Ortoclase	8,54	12,99	7,18	116,16	715,80	Monoclínico	C2/m
	Albita	8,29	12,99	7,14	116,01	692,19	Monoclínico	C2/m
	Pigeonita	9,42	8,85	5,25	103,56	425,51	Monoclínico	C2/m
	Augita	9,75	8,90	5,27	106,02	439,99	Monoclínico	C2/c

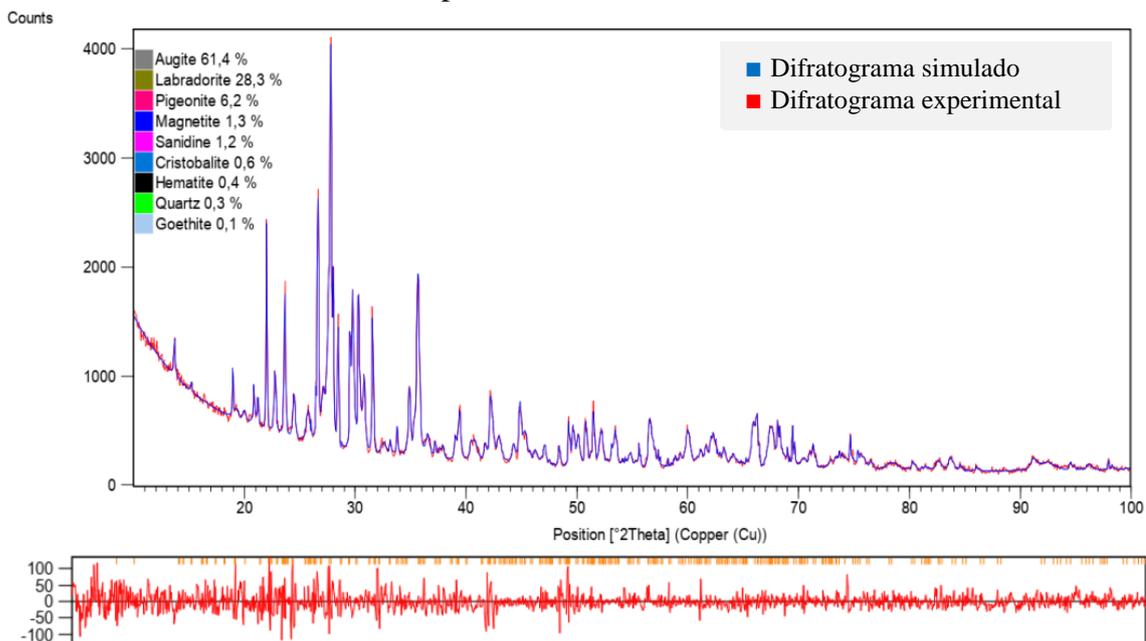
Fonte: O Autor (2024).

Conforme ilustrado nas Figuras 17, 18 e 19, as análises realizadas com os pós de rochas permitiram identificar as composições mineralógicas específicas de cada amostra e o percentual

em massa das fases cristalinas foi obtido por meio do refinamento pelo método de Rietveld, aplicado aos dados de difração de raios X (DRX) das amostras, com o uso do *software* X'Pert High Score Plus. Esse método permite ajustar um modelo simulado aos dados experimentais, considerando parâmetros como fatores de forma, intensidade e largura dos picos, além de correções instrumentais e estruturais, garantindo uma análise quantitativa precisa para cada fase identificada (GOBBO, 2009). Na amostra PR51, os grupos minerais detectados foram quartzo, plagioclásio, feldspato alcalino, piroxênio, espinélio e diáspora. A amostra PR53 apresentou uma composição mineralógica de quartzo, plagioclásio, feldspato alcalino, piroxênio, caulinita e óxido. Já na amostra PR68, os grupos minerais identificados foram quartzo, plagioclásio, feldspato alcalino e piroxênio.

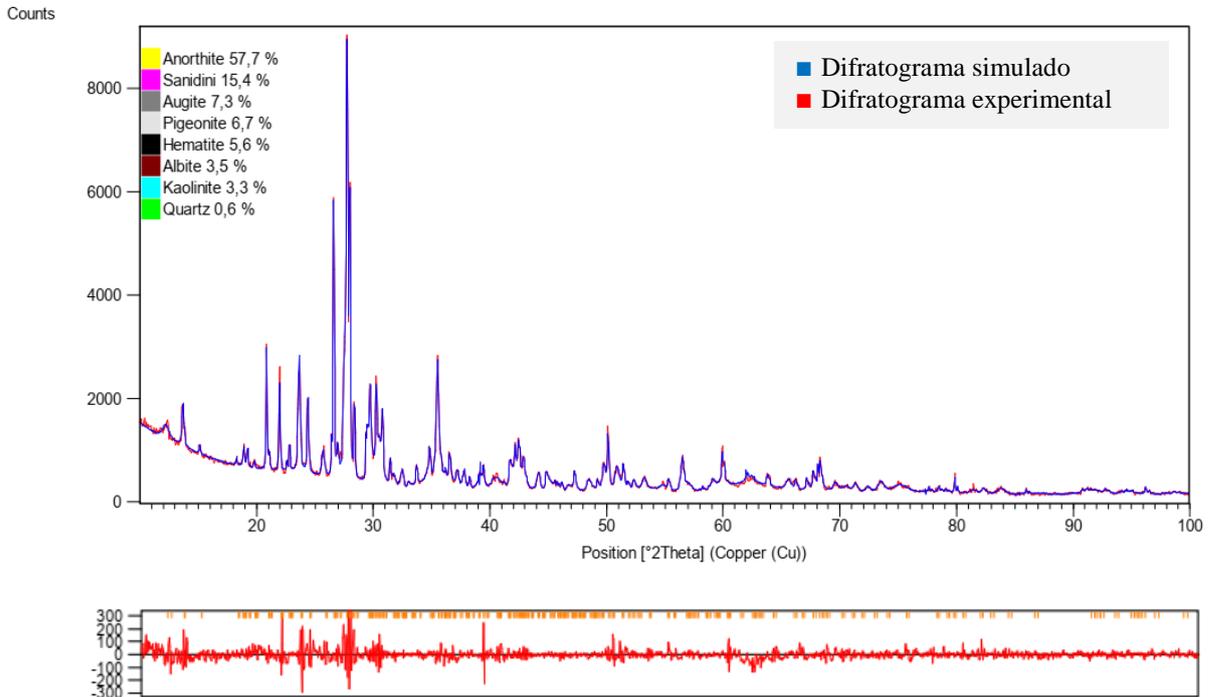
Dentre as fases cristalinas observadas nas amostras analisadas, o grupo dos plagioclásios destacou-se como o mais abundante. Notou-se que o quartzo foi identificado na amostra PR53 (0,6 %), e apresentou a menor porcentagem na amostra PR51 (0,3 %), enquanto alcançou a maior proporção na amostra PR68 (33,3 %), em relação aos demais minerais. Esses resultados refletem as diferenças mineralógicas intrínsecas das amostras e destacam a variabilidade composicional dos pós de rochas estudados.

Figura 16 - Comparação entre o difratograma experimental e o difratograma simulado para a amostra PR51. O painel inferior representa a diferença entre os dois difratogramas, experimental e simulado.



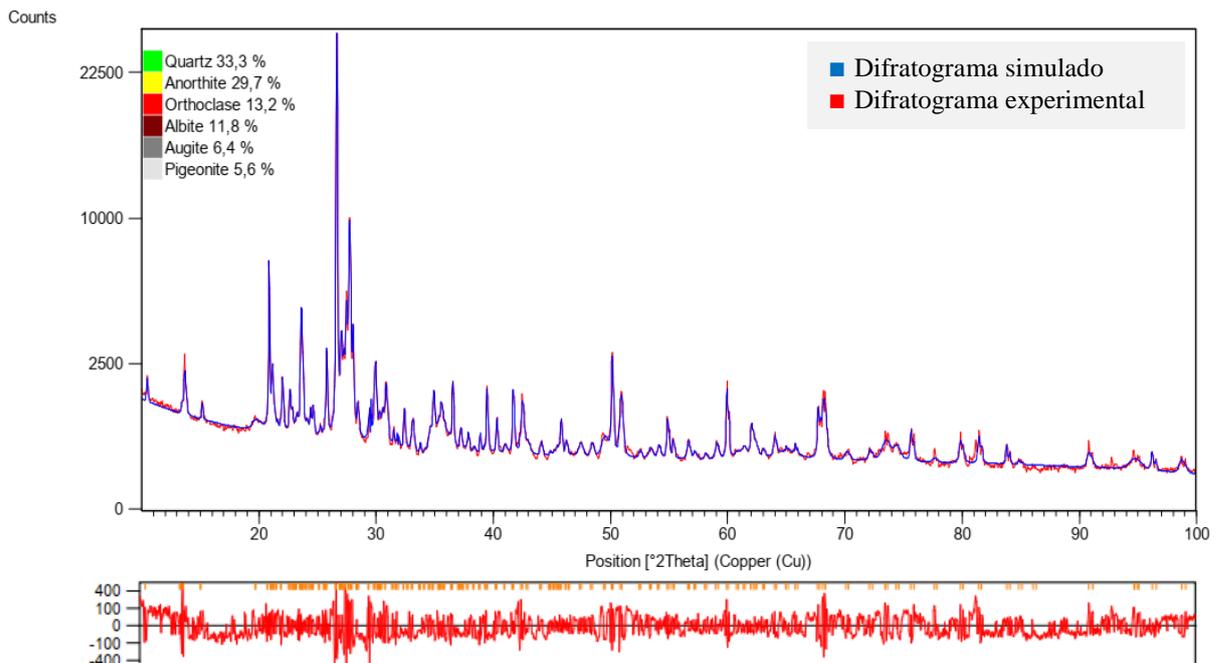
Fonte: O Autor (2024).

Figura 17 - Comparação entre o difratograma experimental e o difratograma simulado para a amostra PR53. O painel inferior representa a diferença entre os dois difratogramas, experimental e simulado.



Fonte: O Autor (2024).

Figura 18 - Comparação entre o difratograma experimental e o difratograma simulado para a amostra PR68. O painel inferior representa a diferença entre os dois difratogramas, experimental e simulado.



Fonte: O Autor (2024).

A Tabela 10 apresenta os indicadores estatísticos das análises realizadas pelo método de Rietveld. A qualidade dos resultados obtidos, evidenciada pelos baixos valores dos índices estatísticos e pela convergência dos parâmetros ajustados, é reforçada pelos gráficos que mostram a diferença entre os padrões experimental e simulado, indicando um refinamento otimizado. Todos os valores de *Goodness of Fit* (GOF) estão abaixo de 3,50, o que indica um excelente ajuste entre os dados experimentais e os modelos calculados. Destaca-se a amostra PR53, cujo GOF de 1,02 é classificado como um refinamento ideal, de acordo com os critérios estabelecidos por Gobbo (2009).

Tabela 10 - Indicadores estatísticos obtidos para cada amostra.

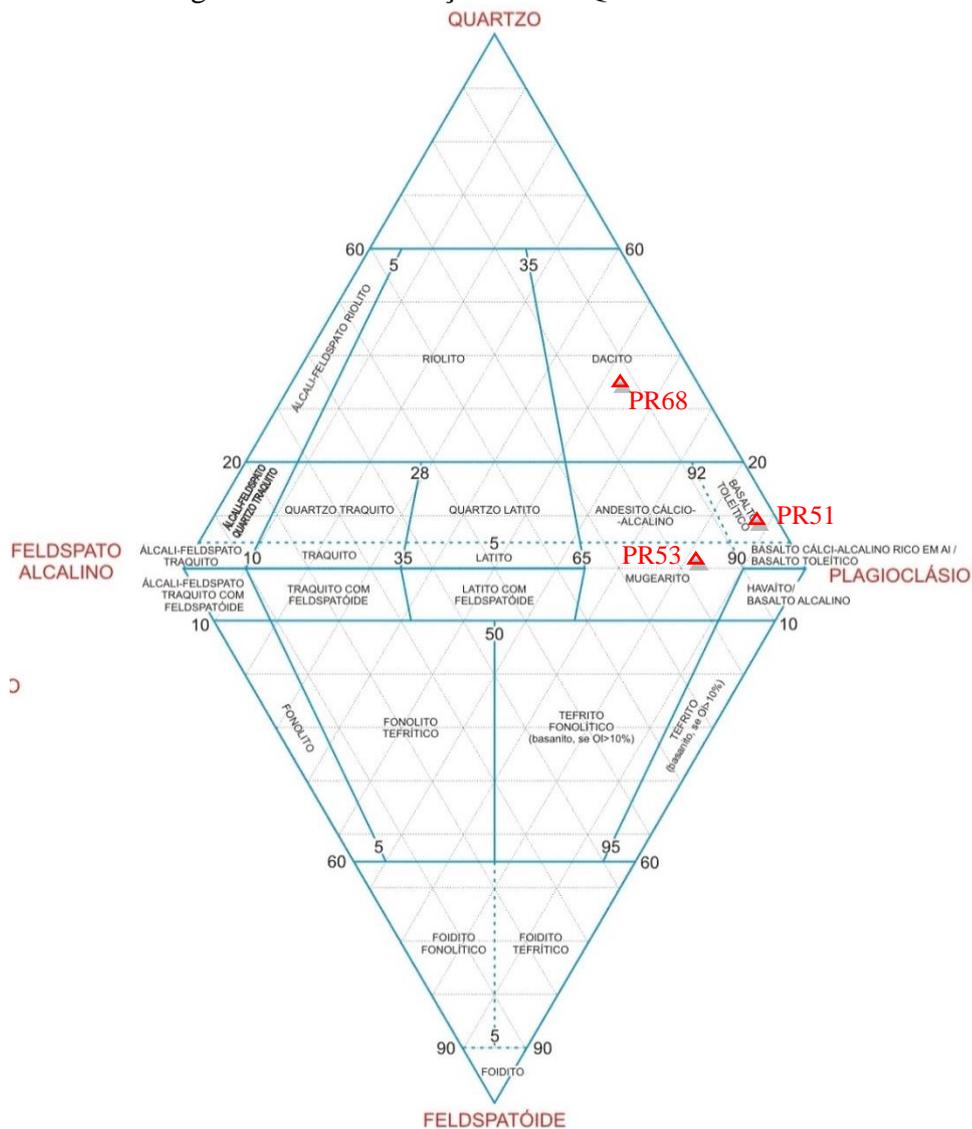
Amostras	R_{expected}	R_{profile}	R_{wp}	GOF
PR51	3,01	2,78	3,43	1,14
PR53	1,60	1,26	1,65	1,06
PR68	1,14	2,35	3,24	2,84

Fonte: O Autor (2024).

Com os dados das fases cristalinas e dos grupos mineralógicos a que as amostras pertencem, foi aplicado o método modal QAPF para rochas vulcânicas, conforme ilustrado na Figura 19. Este método de classificação, no qual sua sigla refere-se aos principais componentes minerais usados para classificar as rochas ígneas, é estruturado em um diagrama em forma de diamante, no qual a ponta superior corresponde ao quartzo (Q), a inferior ao feldspatoide (F), a extremidade esquerda ao feldspato alcalino (A) e a direita ao plagioclásio (P). Para a aplicação desse método, as demais composições mineralógicas são desconsideradas, sendo o cálculo realizado com base na porcentagem relativa dos minerais presentes no diagrama.

Assim, para cada pó de rocha, foram analisadas as porcentagens dos minerais e os dados foram plotados no diagrama QAPF. Nesse contexto, observou-se que a amostra PR68, anteriormente classificada como dacito pelo diagrama de TAS e como riolito pelo diagrama de Cox *et al.* (1979), foi classificada como dacito pelo método QAPF, corroborando o resultado obtido pelo diagrama de TAS. Já a PR51 e PR53 ficaram na região designada para os minerais classificados como basaltos e andesitos, não modificando as classificações anteriores.

Figura 19 - Classificação modal QAPF de rochas vulcânicas.



Fonte: Adaptado de Wernick (2003).

Nos difratogramas apresentados nas Figuras 17, 18 e 19, observa-se que as amostras apresentam picos bem definidos, indicando ausência de características amórficas. Os resultados reportados por Hoppe Filho *et al.* (2017), Liu *et al.* (2016) e Villar-Cociña *et al.* (2020) indicam que, na faixa de 15 a 30°, materiais contendo sílica ativa tendem a apresentar o halo característico de material amorfo. No entanto, esse comportamento não foi detectado nas amostras, o que sugere que os pós de rochas estudados apresentam caráter inerte.

Considerando os tamanhos das partículas dos pós de rochas apresentados anteriormente e a ausência de amorfismo, evidencia-se que esses pós de rochas atuam predominantemente como agentes de preenchimento, com baixa capacidade pozolânica. Já que não apresentam indicativos de estrutura amorfa, não poderiam ser classificados como pozolanas. No entanto,

como efeito fíler podem atuar no melhoramento do empacotamento das partículas e propiciar pontos extras para a nucleação dos compostos hidratados formados (ABO-EL-ENEIN *et al.*, 2015; SILVA, 2016; MEDEIROS *et al.*, 2017)

A partir dos resultados obtidos nos refinamentos e da definição da linha de base, foi realizado o cálculo da cristalinidade e amorfismo utilizando a Equação 11. Os valores calculados estão apresentados na Tabela 11, que detalha os resultados observados.

Tabela 11 – Estimativa da cristalinidade.

Amostras	% Fase Cristalina
PR51	88
PR53	86
PR68	82

Fonte: O Autor (2024).

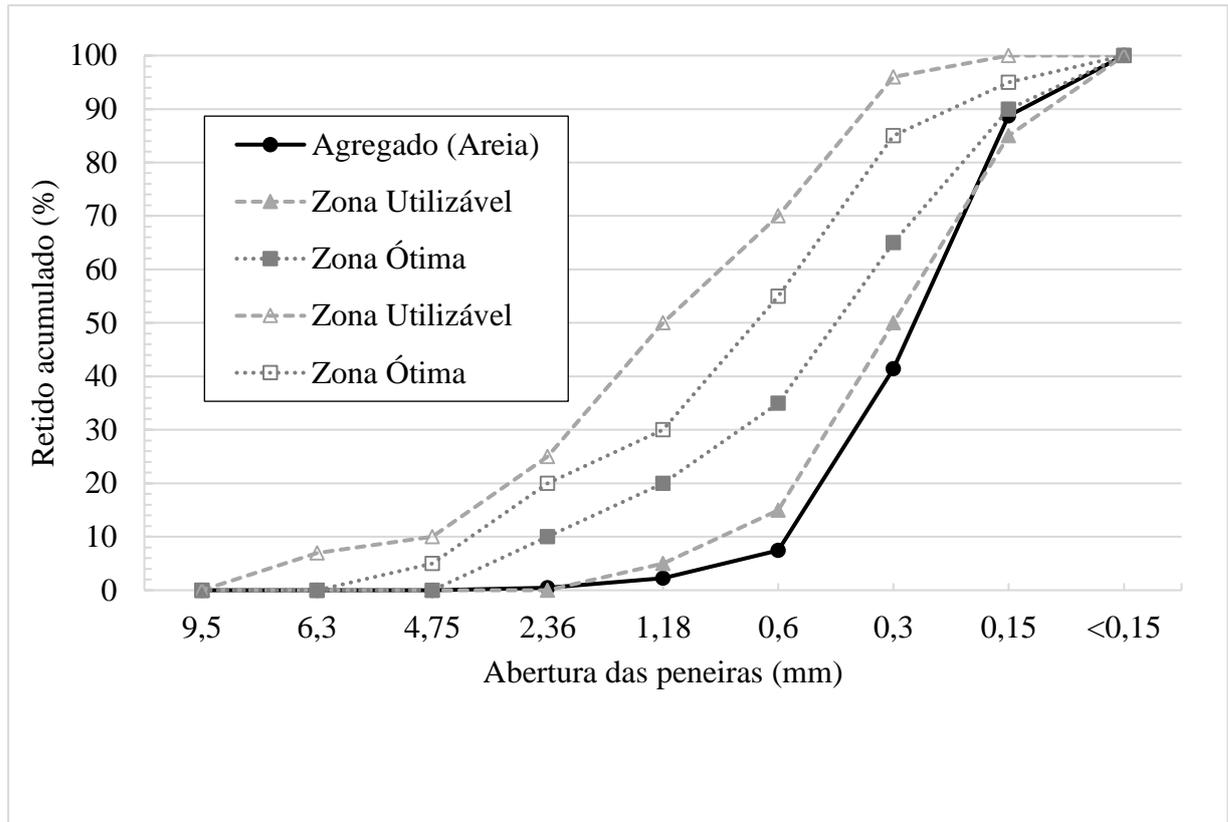
As amostras PR51, PR53 e PR68 apresentaram teores de fase amorfa de 12 %, 14 % e 18 %, respectivamente. Estes resultados estão em consonância com estudos realizados por Bhagath e Subramaniam (2017), Rêgo (2004) e Paya (2001), os quais classificam materiais com teor amorfo inferior a 20 % como inertes. Portanto, os dados obtidos corroboram a conclusão de que os materiais analisados possuem características predominantemente inertes, apresentando baixa capacidade pozolânica.

4.1.2 Agregados

Inicialmente, foram estabelecidas as curvas granulométricas de referência que representam as faixas recomendadas para os agregados empregados na preparação de materiais cimentícios, assim especificados pela norma ABNT NBR 7211 (2005). A Figura 20 ilustra as faixas ótimas e utilizáveis, além dos dados granulométricos da areia utilizada nesse trabalho para todos os preparados de argamassa.

O módulo de finura da areia foi de 1,4, situando-se abaixo da zona utilizável inferior de 1,55 a 2,20 (ABNT NBR 7217, 2003). A areia analisada é classificada como areia fina, sendo que mais de 70 % da sua zona granulométrica está entre 0,42 e 0,075 mm (ABNT NBR 7225, 1993). Observando-se os dados percebe-se que a areia é bem graduada, visto que, o valor do Coeficiente de Curvatura (Cc) está entre 1 e 3. Sendo assim, apresenta distribuição proporcional do tamanho das partículas, de forma que os espaços deixados pelas partículas maiores sejam ocupados pelas partículas menores (CAPUTO, 2007).

Figura 20 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo (Areia).

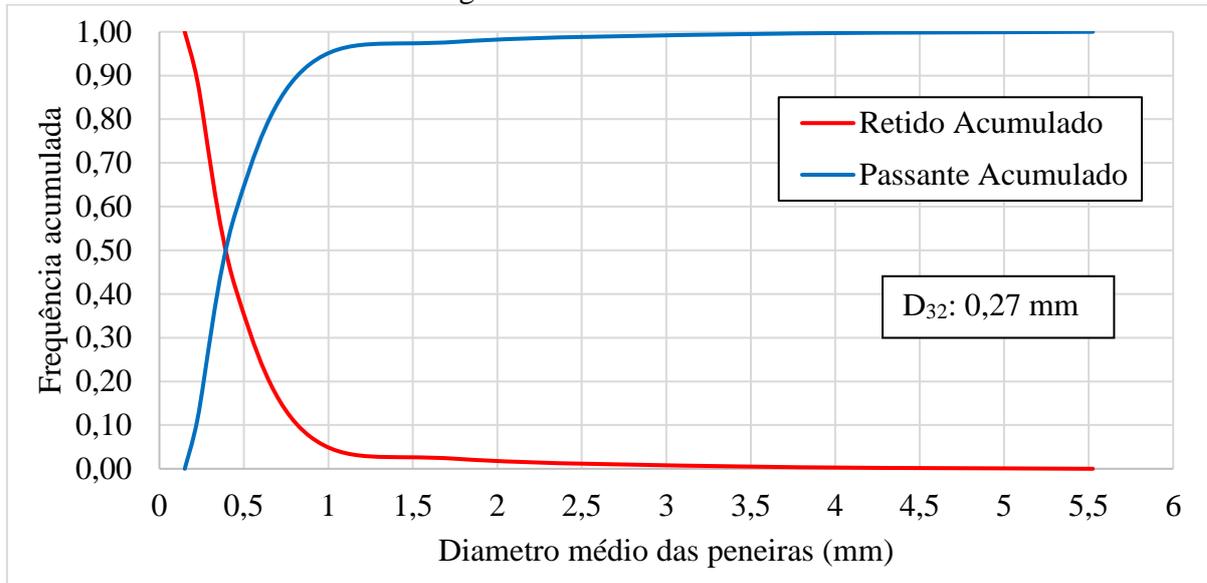


Fonte: O Autor (2024).

A Figura 21 apresenta a análise granulométrica da areia utilizada, representada pelas curvas de frequência acumulada para as frações de material retido e passante nas peneiras. A curva do retido acumulado, curva em vermelho, demonstra a fração do material que foi retido nas peneiras, indicando a presença de partículas menores na areia. No gráfico, a curva começa com uma fração acumulada próxima a 1 para diâmetros pequenos, estando mais de 50 % do material retido nas peneiras com abertura menores que 0,5 mm. A curva decresce rapidamente à medida que o diâmetro aumenta, sugerindo uma granulometria majoritariamente fina, conforme já observado no parágrafo anterior.

A curva do passante acumulado, representada em azul, ilustra a fração acumulada de partículas que passaram pelas peneiras. A curva inicia com valores próximos a zero para diâmetros menores e aumenta gradualmente à medida que o diâmetro médio das partículas cresce, confirmando que a maior parte do material é composta por partículas pequenas. No gráfico, é possível observar o ponto de interseção entre as duas curvas, indicando o diâmetro médio no qual a quantidade de material retido é igual à quantidade de material passante. Este ponto corresponde aproximadamente ao diâmetro médio de Sauter (D32) de 0,27 mm.

Figura 21 - Curvas de frequência acumulada de retido e passante para análise granulométrica da areia.



Fonte: O Autor (2024).

4.2 ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA

Na Figura 22, observa-se os resultados experimentais da influência dos pós de rocha na trabalhabilidade das argamassas frescas. Conforme ilustrado, as argamassas com inclusões de pós de rocha exibiram valores médios de abatimento distintos da argamassa de referência. Para verificar a existência de diferenças estatisticamente significativas nos dados experimentais, foi realizada a análise de variância (ANOVA). Os resultados indicaram que as diferenças observadas entre as argamassas foram estatisticamente significativas, com base em um nível de significância de 5%. Isso demonstra que as misturas apresentam variações significativas em suas médias. No entanto, a análise das medições individuais para cada teor incorporado não apresentou significância estatística, o que indica uma baixa variabilidade intragrupo, conforme demonstrado na Tabela 12.

Tabela 12 - Análise de variância dos dados referentes as variáveis do estudo para o espalhamento.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Argamassas	6235,9	9	692,9	45,8	0*	2,5
Medições	24,8	2	12,4	0,9	0,4 ^{ns}	3,6
Erro	272,5	18	15,1			
Total	6533,2	29				

^{ns} = não significativo, * = significativo, ao nível de 5 %.

Fonte: O Autor (2024).

Uma vez que o valor-P e o teste F da ANOVA apresentaram resultados significativos, o teste de Tukey foi aplicado, e os resultados apresentados na Tabela 13. Os dados mostram que o tipo e o teor dos pós de rocha influenciam diretamente a trabalhabilidade das argamassas. Dessa forma, pela aplicação do teste de Tukey, é possível constatar que a incorporação do PR68 resultou em diferenças estatisticamente significativas para todos os teores de substituição parcial do cimento Portland, com ressaltos para o melhor desempenho da argamassa CPR68 5%. Isso pode ser atribuído ao fato de que a granulometria e o módulo de finura do pó de rocha PR68 são menores que as demais (Figura 11 e Tabela 7). Observa-se, ainda, uma tendência linear de aumento de trabalhabilidade com a utilização de adições menos grosseiras. Esse comportamento é evidenciado pelo fato de o PR51, que apresentou o maior valor de diâmetro médio de Sauter, ter resultado em menores valores de trabalhabilidade. Em contrapartida, o PR68, com o menor valor de diâmetro médio de Sauter, demonstrou maior trabalhabilidade. Já o PR53, cujo diâmetro médio de Sauter é intermediário entre as demais, apresentou valores de trabalhabilidade correspondentes a essa posição, conforme ilustrado na Figura 22.

Os melhores resultados que demonstram ser alinhados com o tamanho das partículas podem ser justificados pelo efeito fíler, que atua preenchendo os vazios na mistura e libera mais água para o movimento das partículas, aumentando assim a fluidez da argamassa (HERMANN *et al.*, 2016; YAHIA *et al.*, 2005; BONAVETTI *et al.*, 2000). O desempenho superior do PR68, em relação aos demais, também decorre do seu teor superior de sílica, cujas partículas mais finas, intensificam o efeito fíler ao preencher os espaços entre as partículas maiores de cimento, como relatado por Adjoudj, *et al.* (2018). No entanto, verificou-se que o aumento do teor de substituição ocasiona uma diminuição da trabalhabilidade, exigindo uma maior relação água/cimento para obter as mesmas propriedades de espalhamento obtidas em misturas com menores teores de adição. Conforme Li *et al.* (2019); Shahriar e Nehdi (2012), esse comportamento ocorre devido à alta superfície específica da sílica, que gera o fenômeno de afastamento das partículas, no qual o volume dessas partículas excede os vazios entre os grãos de cimento, promovendo o afastamento das partículas menores das maiores. O volume de água liberado é insuficiente para envolver as partículas, reduzindo a espessura da película de água ao redor, dificultando a trabalhabilidade da mistura no estado fresco.

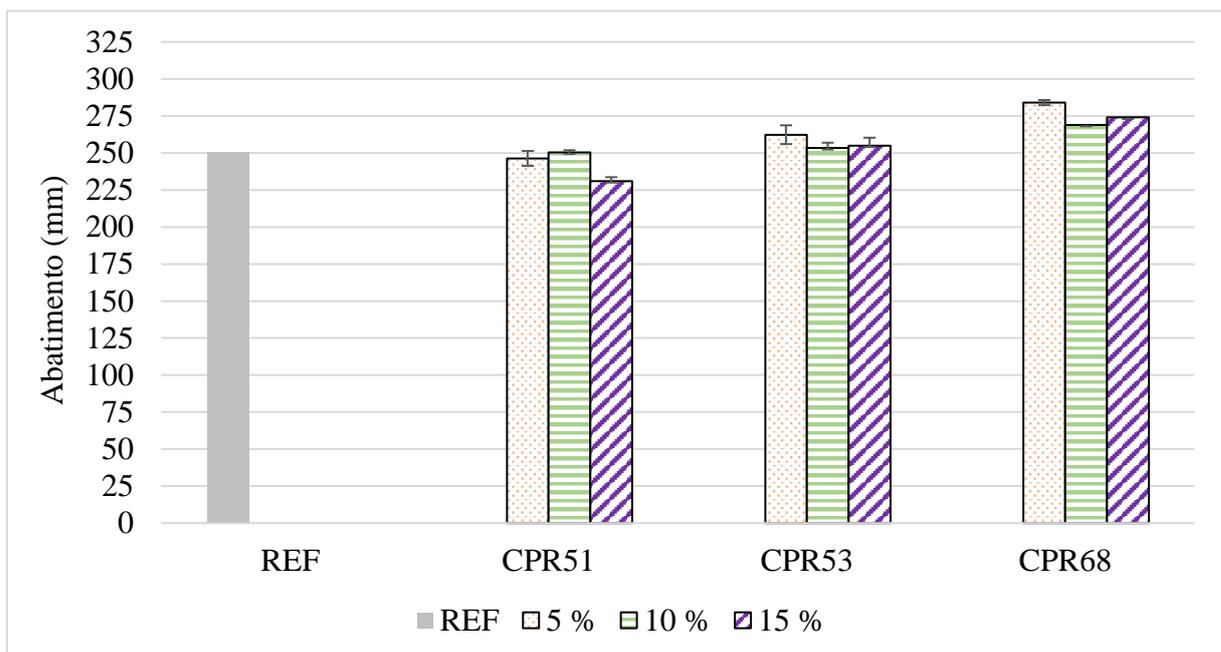
Tabela 13 - Teste de Tukey aplicados às médias das variedades de argamassas com relação à variável de referência para o espalhamento (mm).

Variedades	Média REF. (S/ Adições)	Média Var. (C/ Adições)	M1 - M2	DMS
CPR51 5 %	250,67	246,33	4,34	11,39
CPR53 5 %	250,67	262,33	11,66	11,39
CPR68 5 %	250,67	284,00	33,33	11,39
CPR51 10 %	250,67	250,33	0,34	11,39
CPR53 10 %	250,67	253,33	2,66	11,39
CPR68 10 %	250,67	269,00	18,33	11,39
CPR51 15 %	250,67	231,00	19,67	11,39
CPR53 15 %	250,67	255,00	4,33	11,39
CPR68 15 %	250,67	274,00	23,33	11,39

|M1 - M2| > DMS apresentam diferença significativa, ao nível de 5 %.

Fonte: O Autor (2024).

Figura 22 – Abatimento nas misturas de argamassas.



Fonte: O Autor (2024).

Considerando o espalhamento das misturas, os diâmetros médios se situaram entre a faixa de 231 e 284 mm, sendo que para a amostra de referência obteve-se 250,67 mm de média. Após uma análise visual das amostras submetidas ao processo de compactação na mesa de queda, verificou-se que não ocorreu segregação ou exsudação em nenhuma das misturas.

4.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão das argamassas para 28 dias, bem como o desvio padrão são apresentados na Figura 23. A substituição de 5 % da massa de cimento pelo pó de rocha PR51 apresentou resistência à compressão axial média de 2,2 % superior ao valor de referência (REF), apesar do aumento observado ser positivo para esse parâmetro, o teste de comparação múltipla indica que ele não representa ganho expressivo de resistência. Do mesmo modo, as argamassas com substituição de 10 % (CP51 – 10 %, CP53 – 10 % e CP68 – 10 %) atingiram, respectivamente, 84,22 %, 87,94 % e 91,66 %, da resistência da argamassa sem adições, valores que não diferem de forma significativa da amostra de referência do ponto de vista estatístico (Tabela 14).

Tabela 14 - Teste de Tukey aplicados às médias das variedades de argamassas com relação à variável de referência para a resistência à compressão axial (MPa).

Variedades	Média REF. (S/ Adições)	Média Var. (C/ Adições)	M1 - M2	DMS
CPR51 5 %	14,51	14,83	0,31	2,45
CPR53 5 %	14,51	10,39	4,12	2,45
CPR68 5 %	14,51	11,14	3,37	2,45
CPR51 10 %	14,51	12,22	2,30	2,45
CPR53 10 %	14,51	12,76	1,76	2,45
CPR68 10 %	14,51	13,30	1,22	2,45
CPR51 15 %	14,51	10,53	3,99	2,45
CPR53 15 %	14,51	10,38	4,14	2,45
CPR68 15 %	14,51	10,25	4,26	2,45

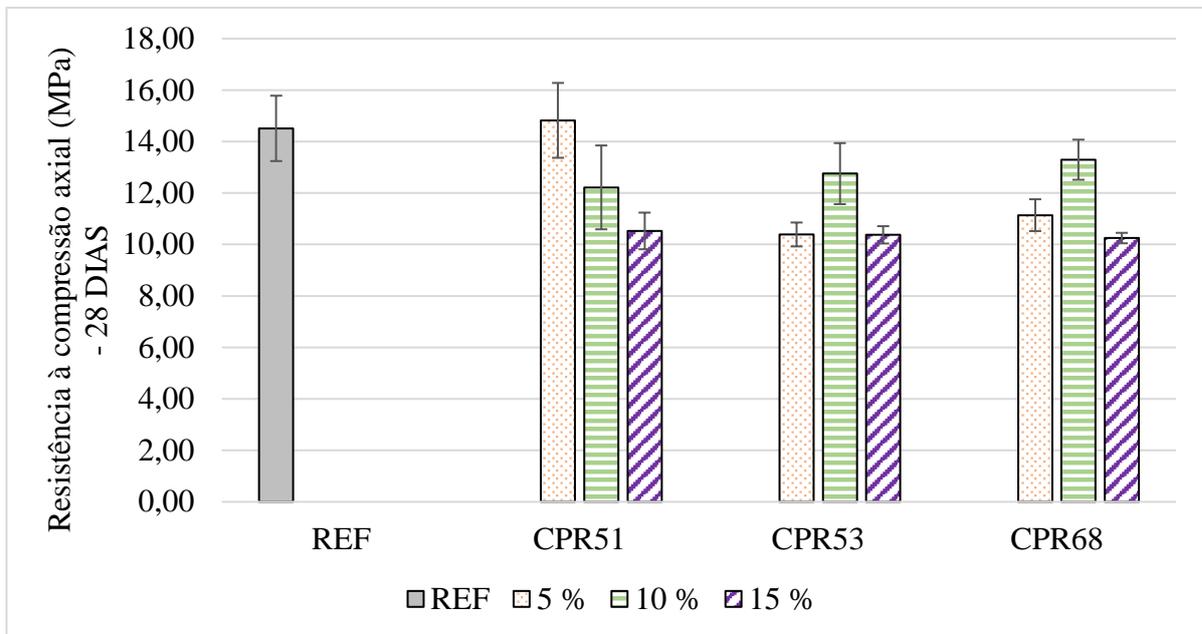
|M1 - M2| > DMS apresentam diferença significativa, ao nível de 5 %.

Fonte: O Autor (2024).

As diretrizes estabelecidas pela norma ABNT NBR 12.653 (2014) determinam que, para um material ser classificado como pozolânico, ele deve atingir um percentual mínimo de 90 % da resistência à compressão da argamassa de referência. Dessa forma, para esse trabalho, isso implica que as argamassas com adições precisam atingir uma resistência mínima de 13,06 MPa. Esse requisito foi atendido pelas argamassas CPR51 5 % e CPR68 10 %, portanto, os pós de rochas PR51 e PR68 apesar de serem classificados como materiais inertes anteriormente apresentam resistências de materiais pozolânicos segundo esse parâmetro da normativa. Em contrapartida, o pó PR53 não se enquadra como pozolânico para este parâmetro. No entanto, a ASTM C618 (2023) estabelece um valor mínimo de controle de 75 %, o que implica que as argamassas devem atingir uma resistência mínima de 10,88 MPa. Conforme está normativa, o

pó de rocha PR53 está em conformidade, visto que a argamassa CPR53 10 % alcançou uma resistência de 12,76 MPa, sendo assim, cumprindo os requisitos para ser classificado como material pozolânico.

Figura 23 - Resistência média à compressão axial das argamassas aos 28 dias.



Fonte: O Autor (2024).

O aumento de teor de PR51 não demonstrou efeitos benéficos para resistência à compressão, conforme ilustrado na Figura 23, exibindo um comportamento distinto em relação às demais amostras analisadas. Nesse caso, o incremento no percentual de adição de PR51 resultou em uma redução progressiva na resistência aos 28 dias, como evidenciada pela comparação dos resultados obtidos para os diferentes teores incorporados. Esse efeito é semelhante com os resultados observados por Burgos *et al.* (2013), que relataram que elevações nos teores de amostras com maiores concentrações de óxido de cálcio não proporcionaram ganhos na resistência mecânica. Ainda, deve-se ressaltar o efeito da granulometria do material, pois quanto mais grosseiro o material, menor a resistência à compressão da argamassa, que pode ser causado pela piora no empacotamento das partículas e redução das reações de hidratação por não contribuírem diretamente, agindo apenas como preenchimento inertes (KABBER; VYAS, 2019).

As amostras PR53 e PR68, com maiores concentrações de sílica, demonstraram melhora com o aumento da fração substituída de cimento. Embora, observa-se a existência de uma porcentagem ótima de substituição, visto que, os valores analisando constataam que as amostras com 5 % e 15 % demonstram valores significativamente inferior aos resultados obtidos para a

porcentagem de 10 %, conforme apresentado na Tabela 15. Segundo Mehta e Monteiro (2008), esse comportamento pode ser explicado devido a um excesso de sílica que pode não reagir totalmente, reduzindo a eficiência e o efeito de diluição do cimento, sendo que à medida que a substituição do cimento aumenta, a quantidade de clínquer disponível na mistura diminui, reduzindo os compostos que contribuem diretamente para a resistência inicial (como o C3S e o C2S), esses responsáveis pela a formação de produtos cimentantes como a do C-S-H (silicato de cálcio hidratado), que contribuem para o aumento da resistência e durabilidade da matriz. Isso pode levar a um enfraquecimento da matriz caso o teor de substituição ultrapasse a zona ótima.

Na Tabela 15 é apresentado o teste de Tukey, considerando apenas as amostras com substituições, portanto desconsiderando a amostra de referência. Os resultados constataam que o teor de 10 % foi o mais eficaz para a PR53 e a PR68, visto que as amostras CPR53 10 % e CPR68 10 % apresentaram resultados significativamente melhores dentro de seus respectivos grupos, sendo condizente com a maioria dos trabalhos citados no Quadro 2. Além disso, essa superioridade na resistência à compressão não foi apenas evidente, mas também estatisticamente significativa em relação aos teores de 5 % e 15 %. Contudo, ao comparar os teores de 5 % e 15 % entre si, não foi observada diferença estatisticamente relevante. Para as amostras com PR51, o aumento no teor de substituição resultou em uma redução acentuada e significativa na resistência à compressão, conforme já discutido anteriormente, evidenciando uma queda elevada de desempenho com o incremento da adição mineral.

Tabela 15 - Resultados do teste de Tukey nas médias de resistência à compressão axial das argamassas para diferentes pós de rochas e teores.

Variável 1	Média V1 (MPa)	Variável 2	Média v2 (MPa)	M1 - M2	DMS
CPR51 5 %	14,83	CPR51 10 %	12,22	2,61	3,49
CPR51 5 %	14,83	CPR51 15 %	10,53	4,30	3,49
CPR51 10 %	12,22	CPR51 15 %	10,53	1,70	3,49
Variável 1	Média V1 (MPa)	Variável 2	Média V2 (MPa)	M1 - M2	DMS
CPR53 5 %	10,39	CPR53 10 %	12,76	2,37	1,82
CPR53 5 %	10,39	CPR53 15 %	10,38	0,02	1,82
CPR53 10 %	12,76	CPR53 15 %	10,38	2,38	1,82
Variável 1	Média V1 (MPa)	Variável 2	Média V2 (MPa)	M1 - M2	DMS
CPR68 5 %	11,14	CPR68 10 %	13,30	2,16	1,52
CPR68 5 %	11,14	CPR68 15 %	10,25	0,89	1,52
CPR68 10 %	13,30	CPR68 15 %	10,25	3,05	1,52

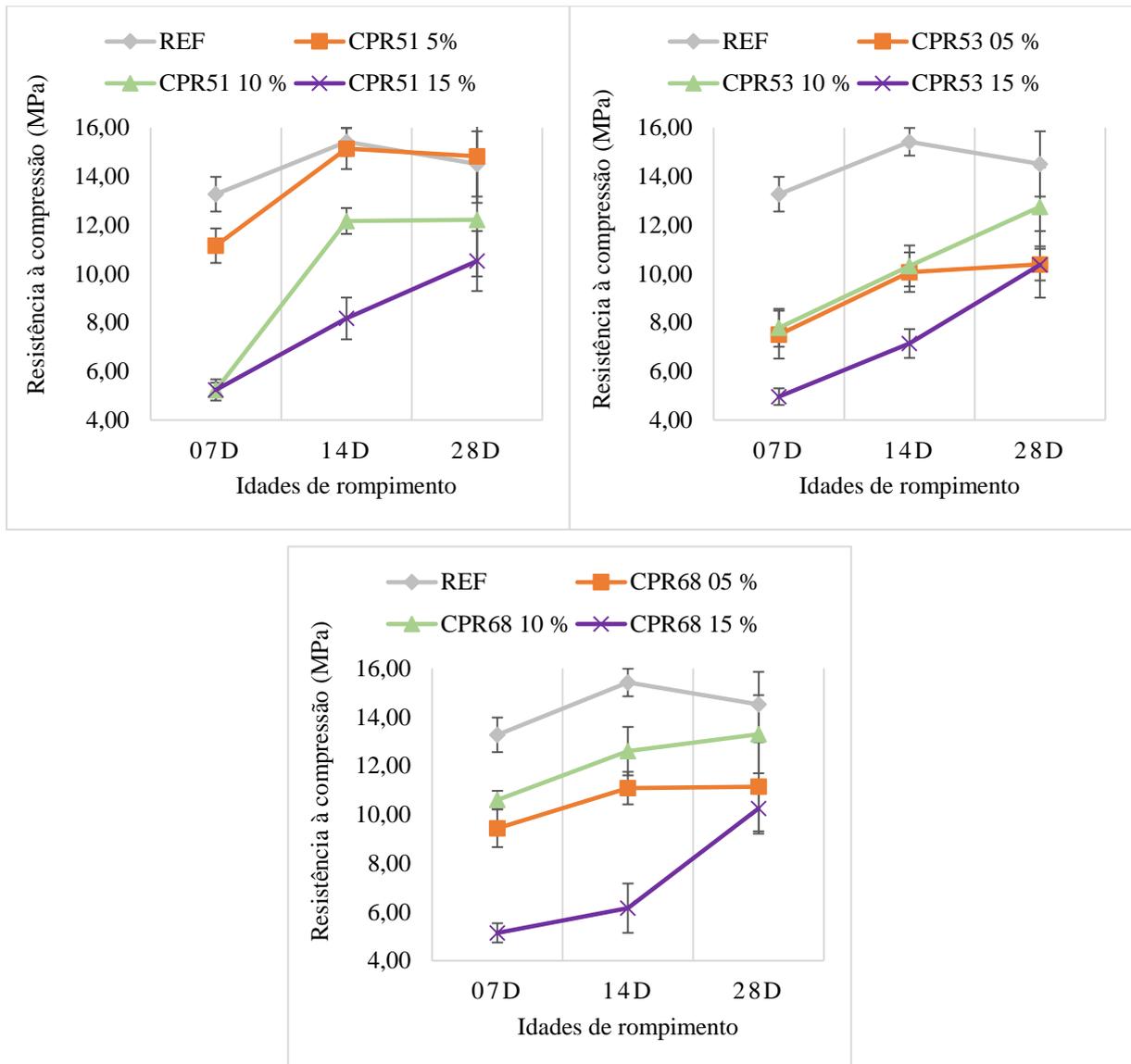
|M1 - M2| > DMS apresentam diferença significativa, ao nível de 5 %.

Fonte: O Autor (2024).

Na Figura 24, observa-se que, nos primeiros dias de hidratação, a amostra de referência (REF) demonstrou maior resistência inicial em comparação com as argamassas com substituições de uma fração do cimento por pós de rochas, comportamento já descrito por Saraya (2014). As menores resistências iniciais das amostras com adições, ao comparar com a referência, se deve a presença de sílica em suas composições, que retardam o endurecimento e reduzem a resistência inicial das argamassas cimentícias. Esse comportamento está relacionado ao efeito de diluição, onde compostos ativos do cimento são diluídos por adições inertes, reduzindo a quantidade de material efetivamente capaz de contribuir com o desenvolvimento da resistência mecânica nos estágios iniciais de cura. Adicionalmente, a disponibilidade limitada de hidróxido de cálcio nas primeiras idades restringe as reações pozolânicas precoces, o que também resulta em menores resistências iniciais nas misturas (BELHADJ *et al.*, 2022).

Apesar dessas limitações iniciais, as argamassas com adições demonstraram um ganho progressivo de resistência à compressão ao longo do tempo, superando a taxa de acréscimo observada na amostra de referência. Consideravelmente, para os primeiros 7 dias de cura, as argamassas com substituição de 15 % da massa de cimento por pó de rocha apresentaram desempenhos inferiores às demais porcentagens de substituição. No entanto, no intervalo entre 7 e 28 dias, essas mesmas amostras exibiram um aumento significativo de resistência, dobrando os valores iniciais. Esse comportamento é consistente com o descrito por Kwan, Ng e Huen (2014), uma vez que, nas primeiras idades, a sílica nos pós de rochas atua predominantemente como agente nucleante, promovendo a formação de produtos de hidratação e contribuindo com o empacotamento das partículas. Em estágios mais avançados, no entanto, essa sílica desempenha um papel pozolânico mais efetivo e melhora o empacotamento das partículas, contribuindo de forma substancial para o ganho de resistência ao propiciar pontos extras para a nucleação de compostos hidratados.

Figura 24 - Evolução das resistências médias à compressão das argamassas em dias (D).



Fonte: O Autor (2024).

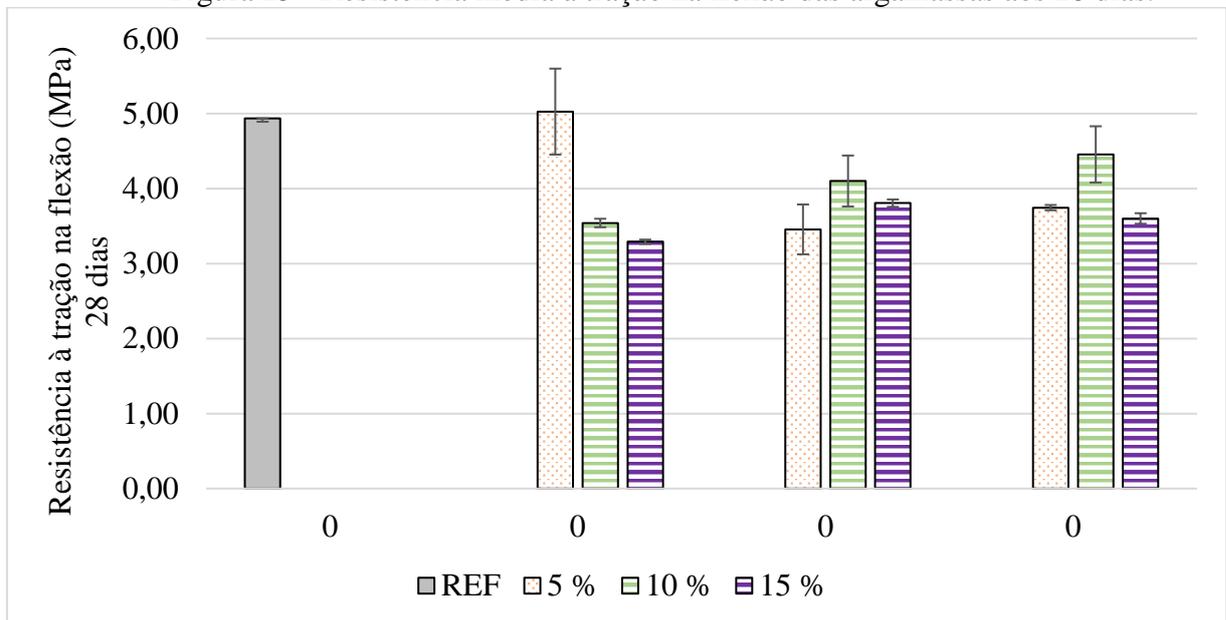
De acordo com as diretrizes de classificação das argamassas estabelecidas na norma ABNT NBR 13281 (2005), todas as amostras foram categorizadas como pertencentes à classe P6, devido à resistência à compressão ter sido superior a 8 MPa.

4.4 RESISTENCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

Os resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão das argamassas aos 28 dias, juntamente com o respectivo desvio padrão, estão representados na Figura 25. Os valores obtidos para a resistência à tração na flexão apresentam similaridade com os resultados para a resistência à compressão. Essa similaridade de desempenho está descrita nas bibliografias, autores como Araújo *et al.* (2015), Siddique e Jang (2020), observaram que as resistências

mecânicas tendem a apresentar comportamentos semelhantes, embora a resistência à compressão geralmente seja superior, devido à natureza do concreto. No caso das amostras de pó de rocha, destaca-se a PR51 com 5 % de substituição, que apresentou os melhores resultados de resistência à tração na flexão, enquanto para PR53 e PR68, as incorporações com 10 % apresentaram os melhores valores numéricos. Também, vale ressaltar que, com exceção da amostra CPR53 05 % e CPR51 15 % que estão na classe R5 as demais amostras classificam-se conforme a norma ABNT NBR 13281 (2005) como argamassas de classe R6, apresentando resistência à tração na flexão acima de 3,5 MPa.

Figura 25 - Resistência média à tração na flexão das argamassas aos 28 dias.



Fonte: O Autor (2024).

Para entender se existe uma variação significativa entre os valores ilustrados na Figura 25, foi realizado uma análise de variância nesses dados. Para ser possível identificar se os valores obtidos para cada amostra de argamassa são significativos.

Tabela 16 - Análise de variância dos dados referentes as variáveis do estudo em relação a resistência à tração na flexão.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Argamassas	6,8348	9	0,7594	9,6931	0,0017 *	3,1789
Medições	0,0058	1	0,0058	0,0783	0,7922 ^{ns}	5,1174
Erro	0,7051	9	0,0783			
Total	7,5457	19				

^{ns} = não significativo, * = significativo, ao nível de 5 %.

Fonte: O Autor (2024).

Os resultados obtidos indicam que, estatisticamente, as argamassas apresentaram variações significativas, sugerindo que a incorporação dos pós de rochas altera a estrutura das argamassas a ponto de influenciar sua resistência mecânica. Outro ponto importante, para corroborar com a confiança dos dados é que, dentro dos conjuntos de medições realizados em laboratório para cada amostra, não ocorreu uma variação significativa nos resultados coletados. Posteriormente, foi aplicado o teste de Tukey, cujos resultados estão apresentados na Tabela 17, para comparar os valores obtidos para as argamassas com pós de rochas com a amostra de referência.

Tabela 17 - Teste de Tukey aplicados às médias das variedades de argamassas com relação à variável de referência para a resistência à compressão axial (MPa).

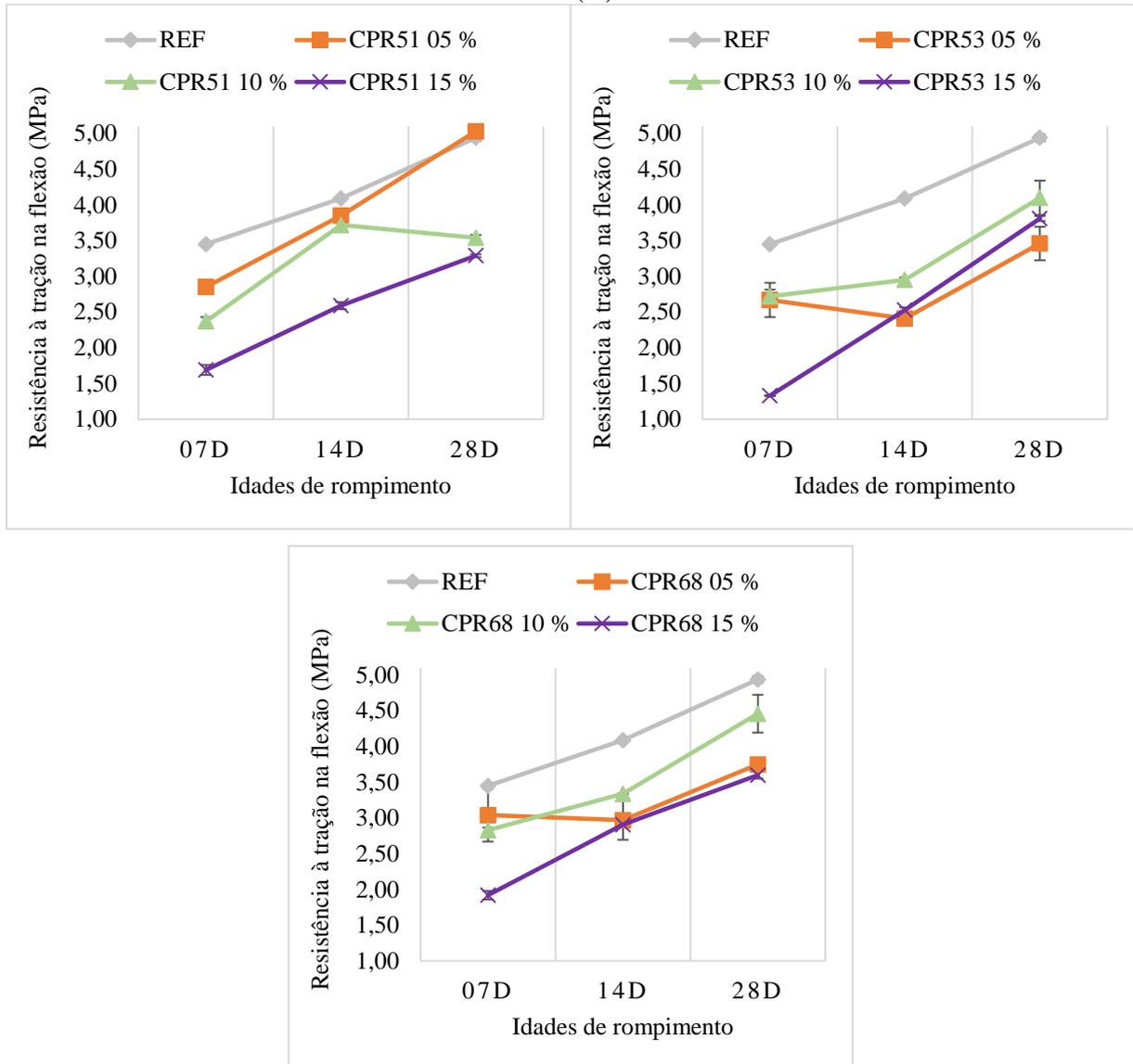
Variedades	Média REF. (S/ Adições)	Média Var. (C/ Adições)	M1 - M2	DMS
CPR51 5 %	4,94	5,03	0,09	1,14
CPR53 5 %	4,94	3,46	1,48	1,14
CPR68 5 %	4,94	3,75	1,19	1,14
CPR51 10 %	4,94	3,54	1,40	1,14
CPR53 10 %	4,94	4,10	0,84	1,14
CPR68 10 %	4,94	4,46	0,48	1,14
CPR51 15 %	4,94	3,30	1,65	1,14
CPR53 15 %	4,94	3,81	1,13	1,14
CPR68 15 %	4,94	3,60	1,34	1,14

|M1 - M2| > DMS apresentam diferença significativa, ao nível de 5 %.

Fonte: O Autor (2024).

Com base nesses resultados, pode-se considerar que os valores de CPR51 5 %, CPR53 10 % e CPR 68 10 % não diferem significativamente do valor obtido para a argamassa de referência. Da mesma forma dos resultados observados para a resistência à compressão, o aumento de teor de PR51 demonstrou ser ineficaz, resultando em uma redução da resistência, enquanto para PR58 e PR68 foi observada uma faixa ótima de incorporação, com 10 % sendo o teor mais eficaz (Figura 26).

Figura 26 - Evolução das resistências médias à tração na flexão das argamassas em dias (D).



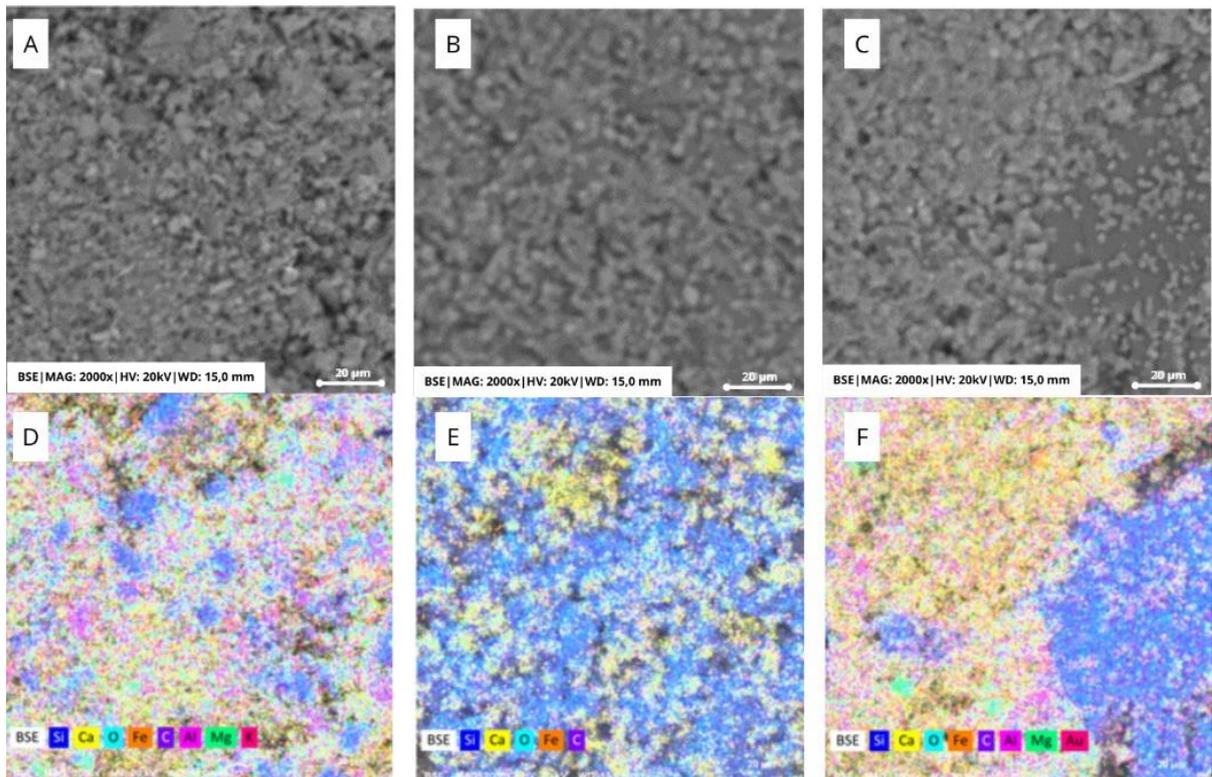
Fonte: O Autor (2024).

4.5 MICROSCOPIA ELETRÔNICA POR VARREDURA DAS ARGAMASSAS

A identificação das fases presentes e a morfologia dos produtos de hidratação foram realizados por microscopia eletrônica de varredura (MEV), utilizando-se de imagens através dos elétrons retroespalhados e elétrons secundários. Nas ilustrações das Figura 27, 29 e 30, são apresentados os mapeamentos dos elementos presentes nas superfícies das amostras analisadas, após 28 dias de cura. Observa-se uma homogeneidade nos produtos de hidratação do cimento, evidenciada pela análise de EDS, que revelou a presença de uma matriz predominantemente rica em silício (Si), envolta por partículas superficiais de cálcio (Ca). Além disso, foram identificados alumínio (Al), oxigênio (O) e ferro (Fe). Com base no tempo de hidratação e na

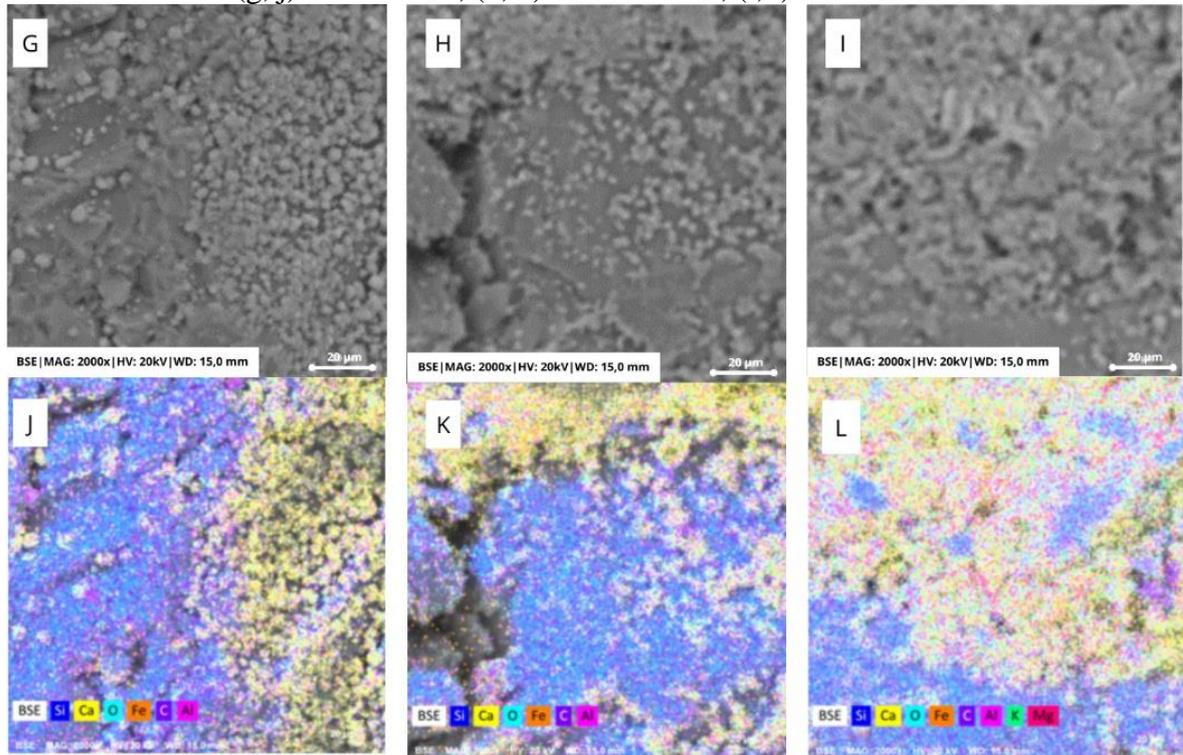
distribuição homogênea desses elementos, é possível deduzir que as amostras apresentam um processo de hidratação mais avançado. Constata-se, a presença de produtos típicos da hidratação em cimentos com substituição parcial do clínquer por material pozolânico, como a formação de C-A-S-H, corroborada pela presença de regiões de nucleação ricas em alumínio (Al), assim como as observadas por Kupwade-Patil *et al.* (2018).

Figura 27 - Microscopia eletrônica de varredura das argamassas com PR51 aos 28 dias - (a, d) CPR51 5 %, (b, e) CPR51 10 %, (c, f) CPR51 15 %.



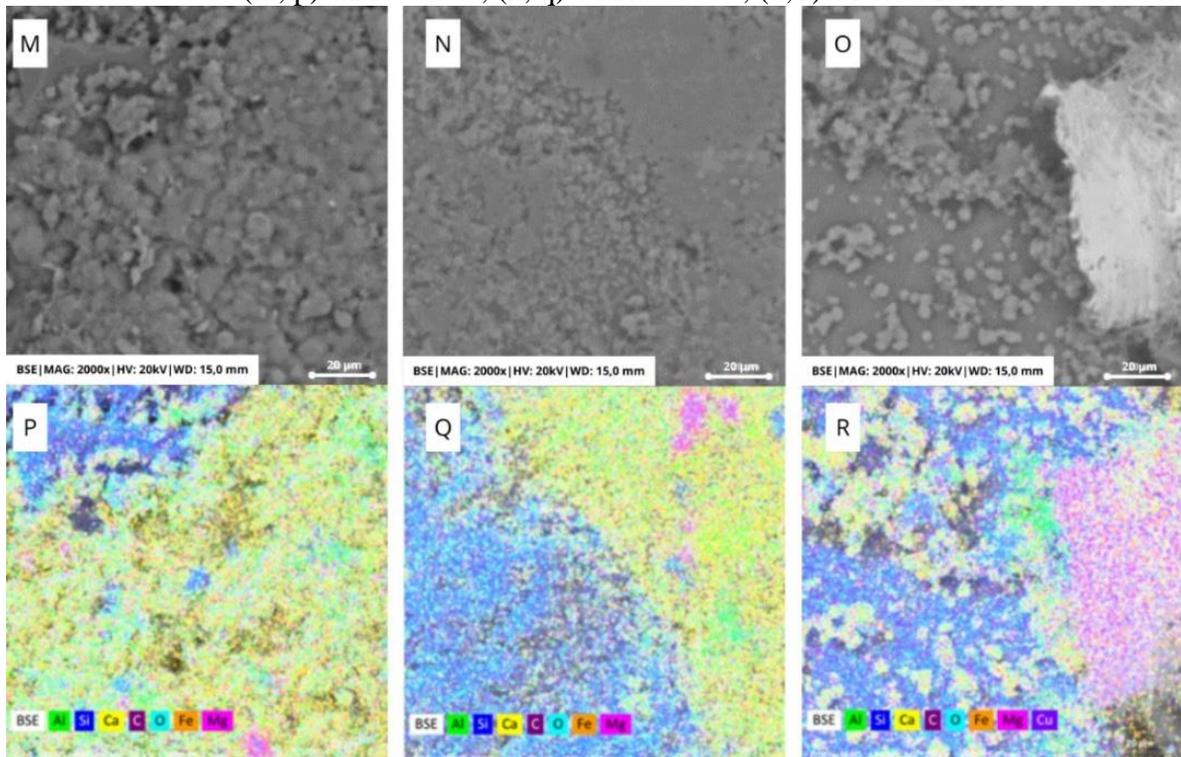
Fonte: O Autor (2024).

Figura 28 - Microscopia eletrônica de varredura das argamassas com PR53 aos 28 dias
 - (g, j) CPR53 5 %, (h, k) CPR53 10 %, (i, l) CPR53 15 %.



Fonte: O Autor (2024).

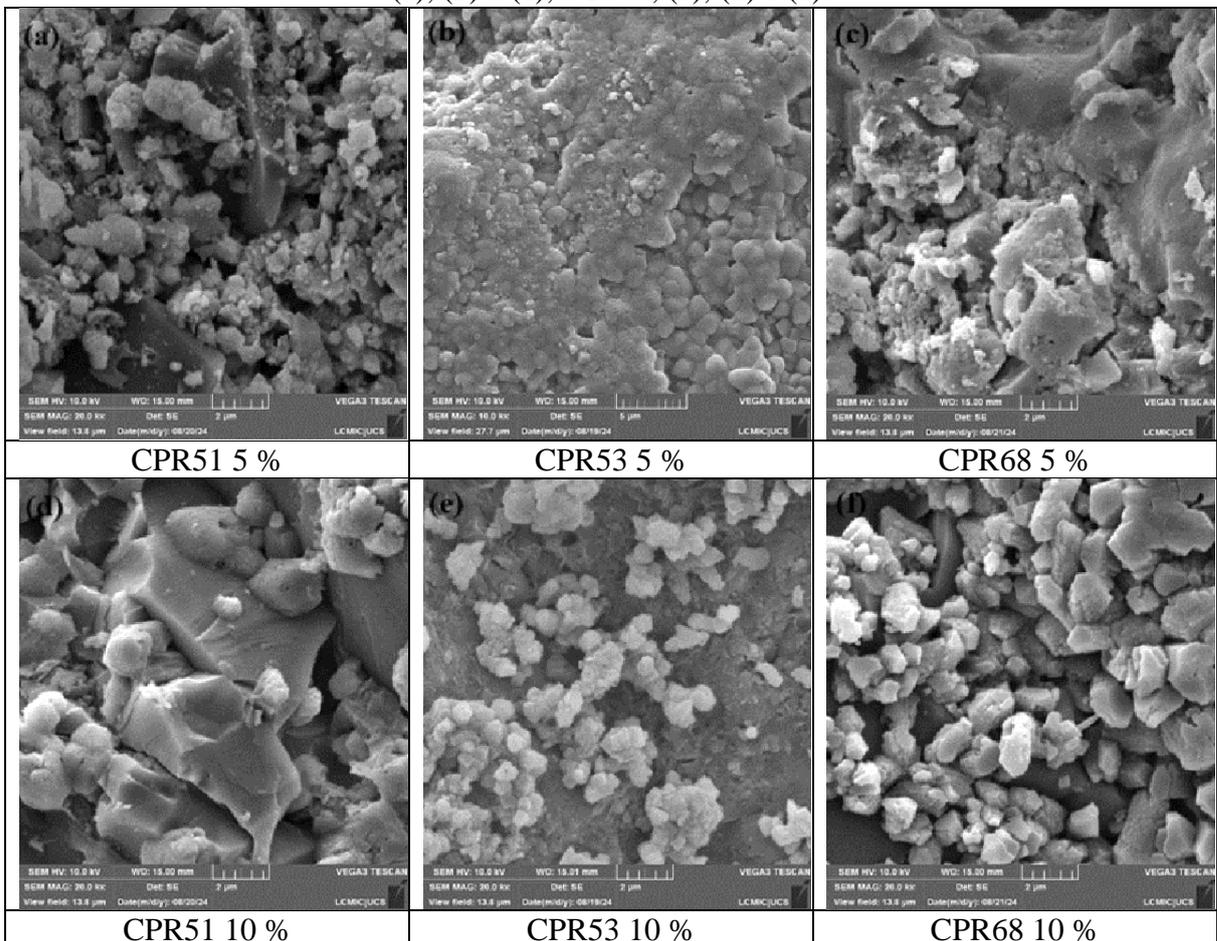
Figura 29 - Microscopia eletrônica de varredura das argamassas com PR68 aos 28 dias
 - (m, p) CPR68 5 %, (n, q) CPR68 10 %, (o, r) CPR68 15 %.



Fonte: O Autor (2024).

As superfícies das argamassas com teores de 5 % e 10 %, após 28 dias de hidratação foram ilustradas nas imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura com aumento de 20.000x, conforme ilustrado na Figura 30. É possível observar uma microestrutura muito densa com a ampliação, não sendo possível observar formas características de transições do processo de hidratação, indicando um processo de hidratação mais avançado (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Ainda, para esses teores, com essa amplificação, a etringita não é observada na superfície das amostras. Na superfície da CPR68 5 % observa-se a presença de fraturas, entretanto algumas dessas pode ser resultado da preparação de amostras, uma vez que as amostras foram preparadas sem polimento.

Figura 30 – Micrografias, obtidas por microscopia eletrônica de varredura aos 28 dias no modo elétrons secundários, da superfície de fratura das argamassas nas composições 5 %, (a), (b) e (c), e 10 %, (c), (d) e (e).

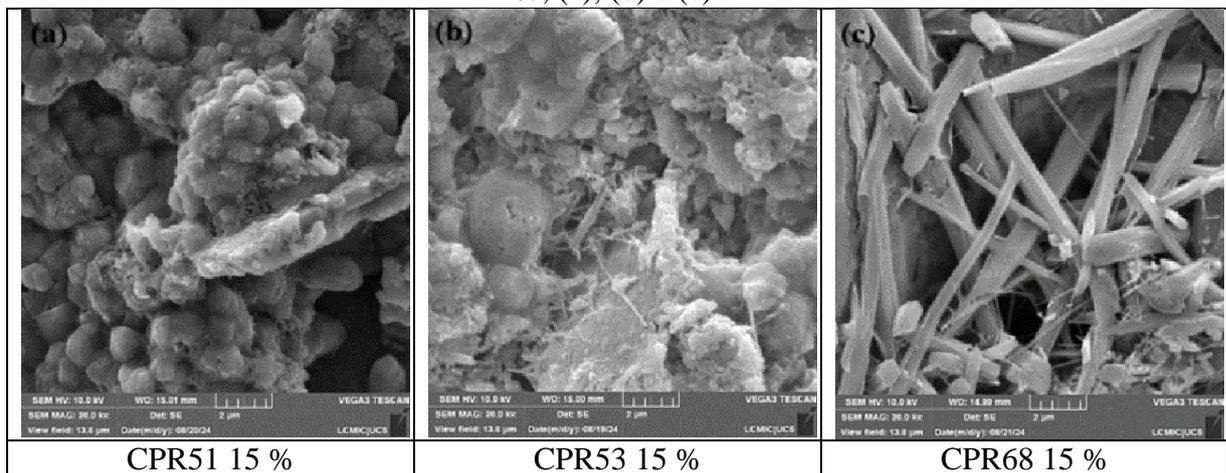


Fonte: O Autor (2024).

As estruturas das argamassas aos 28 dias, com incorporações de 15 % demonstram poros com diferentes dimensões, distribuídos de forma aleatória, sendo mais visíveis nesse teor. Neste teor as adições minerais exibiram características típicas do processo de hidratação,

evidenciando elementos de transição. Na análise de MEV com aumento de 20.000x, ilustrado na Figura 31, é possível observar a zona de transição, destacada pela presença de regiões mássicas com aspecto de gel ao redor de partículas maiores e a presença de redes reticulares, características da morfologia de C-S-H (Figura 31a e Figura 31b). Essas áreas evidenciam a interação entre os materiais cimentícios e os agregados, contribuindo para o comportamento mecânico da argamassa. Além disso, nota-se a presença de portlandita e a fase de etringita, identificadas nas amostras CPR53 15 % e CPR68 15 % (Figura 31b e Figura 31c). A etringita, caracterizada por sua morfologia em forma de agulhas, é uma fase intermediária e metaestável. Sua presença nas amostras com 15 % de adições minerais aos 28 dias de cura sugere um processo de hidratação mais lento em comparação com as estruturas observadas em outros teores (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Essas observações são consistentes com os resultados discutidos anteriormente para resistência à compressão e à tração na flexão, evidenciando a influência dos teores de adições minerais no desempenho mecânico das argamassas. Em especial, teores mais elevados de adições minerais indicam uma possível associação com o retardamento do processo de hidratação, impactando a formação e a evolução das microestruturas ao longo do tempo.

Figura 31 - Micrografias, obtidas por microscopia eletrônica de varredura aos 28 dias no modo elétrons secundários, da superfície de fratura das argamassas nas composições de 15 %, (a), (b) e (c).



Fonte: O Autor (2024).

5 CONCLUSÕES

Este estudo possibilitou a análise da substituição parcial do cimento Portland por pós de rochas em misturas de argamassas, investigando sua influência nas resistências à compressão, à flexão na tração e na trabalhabilidade. Além das propriedades mecânicas e da trabalhabilidade, foram realizados ensaios físicos para caracterização dos materiais, bem como ensaios de microscopia eletrônica para uma compreensão mais profunda dos resultados obtidos. Esse conhecimento é fundamental para avaliar a viabilidade da substituição do cimento sem comprometer significativamente o desempenho das argamassas.

O índice de consistência apresentou ganhos significativos com a incorporação do pó de rocha PR68. Ao avaliar o teor ideal de substituição por adições minerais nas argamassas estudadas, observou-se que, com exceção da amostra PR51 com 10% de substituição, os demais exemplares apresentaram os melhores resultados de abatimento médio com 5% de adição. Em relação à resistência mecânica média, a amostra PR51 obteve seu melhor desempenho com 5% de substituição, enquanto as amostras PR53 e PR68 apresentaram os melhores resultados com 10%.

O aumento da substituição para 15% mostrou-se ineficaz, do ponto de vista das resistências mecânicas, para todas as amostras analisadas após 28 dias de cura. Ressalta-se que os teores ótimos de substituição identificados são válidos apenas para o período de hidratação de até 28 dias.

As amostras de referência (REF) apresentaram superioridade nas idades iniciais, ao comparar com as amostras com modificações na massa total de cimento. Ao analisar a resistência à compressão e tração na flexão aos 28 dias, percebe-se que as argamassas CPR51 5 %, CPR53 10 % e CPR68 % apresentam resultados estatísticos próximos do valor de referência.

As resistências e propriedades das argamassas dependem muito da composição química das rochas utilizadas, entretanto, com base nos resultados deste estudo, pode-se concluir que as argamassas contendo as rochas PR51, PR53 e PR68 apresentam capacidade para manter as propriedades mecânicas de resistência a compressão e à flexão na tração com o passar do tempo, em substituição parcial do cimento Portland. Entende-se, também, que o ganho nas propriedades de trabalhabilidade é significativo em relação à amostra de referência, dando facilidade para que a argamassa possa ser moldada e aplicada.

Contudo, é importante destacar que os materiais utilizados, por apresentarem características predominantemente inertes, ficam suscetíveis a reações com os componentes

da mistura ao longo do tempo. Tal interação pode resultar tanto na continuidade da contribuição para o ganho de resistência quanto na possibilidade de danos à estrutura, especialmente em virtude da presença de sílica reativa e álcalis livres (sódio e potássio). Na presença de umidade, esses álcalis podem formar um gel expansivo que, ao absorver água, gera pressões internas, ocasionando fissuras, perda de resistência e redução da durabilidade do concreto.

Para trabalhos futuros, recomenda-se o aprofundamento das investigações quanto ao comportamento das resistências mecânicas após os 28 dias de cura, bem como das reações químicas que ocorrem ao longo do tempo na microestrutura dos compósitos. Além disso, permanece em aberto a análise do potencial dos pós de rocha em promover, de forma significativa, o efeito fíler, favorecendo o empacotamento das partículas e, conseqüentemente, a redução da permeabilidade à umidade.

REFERÊNCIAS

AMERICAN ASSOCIATION FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **C618**. Specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. ASTM International, Pennsylvania, United States. ASTM. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 376**. Materiais metálicos — Calibração de instrumentos de medição de força utilizados para a verificação de máquinas de ensaio uniaxiais. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12653**. Materiais pozolânicos. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 7500-1**. Materiais metálicos — Calibração e verificação de máquinas de ensaio estático uniaxial - Parte 1: Máquinas de ensaio de tração/compressão — Calibração e verificação do sistema de medição de força. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11579**: Cimento Portland — Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). Rio de Janeiro, 2013.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13281**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7217**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10007**: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13956-1**: Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta Parte 1: Requisitos, Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15900**: Água para amassamento do concreto Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16372**: Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar de cimento Portland. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16541** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura para a realização de ensaios. Rio de Janeiro, 2016.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502**: Solos e rochas — Terminologia. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7225**: Materiais de Pedra e Agregados Naturais. Rio de Janeiro, 1993.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 23**: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação de massa específica. Rio de Janeiro, 2020.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP) (São Paulo). **A versatilidade do cimento brasileiro**. Disponível em: <https://abcp.org.br/cimento/tipos/>. Acesso em: 15 jan. 2024.

ABO-EL-ENEIN, S. A. *et al.* Physico-mechanical properties of composite cement pastes containing silica fume and fly ash. **Housing and Building National Research Center**, v. 11, p. 7-15, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hbrcj.2014.02.003>

ADJOUDJ, M'hamed; EZZIANE, Karim; KADRI, El Hadj; SOUALHI, Hamza. Study of the Rheological Behavior of Mortar with Silica Fume and Superplasticizer Admixtures According to the Water Film Thickness. **Ksce Journal Of Civil Engineering**, [S.L.], v. 22, n. 7, p. 2480-2491, jul. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1007/s12205-017-0228-3>.

ANTIOHOS, S. K.; PAPADAKIS, V. G.; TSIMAS, S. Rice husk ash (RHA) effectiveness in cement and concrete as a function of reactive silica and fineness. **Cement and Concrete Research**. V. 61-62, p. 20-27, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.04.001>

APOLINÁRIO, E. C. A. **Influência da adição do resíduo proveniente do corte de mármore e granito (RCMG) nas propriedades de argamassas de cimento Portland.**

Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental Urbana, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2014.

ARAÚJO, T. R. de *et al.* Efeitos da incorporação do fíler calcário e do resíduo da biomassa da cana-de-açúcar em argamassas autonivelantes. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS*, 11., 2015, Porto Alegre. Anais [...]. Porto Alegre: SBTA, 2015. p. 1-15.

ARUNTAS, H. Y. *et al.* Utilization of waste marble dust as an additive in cement production. **Materials & Design**, v. 31, n. 8, p. 4039-4042, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.03.036>

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção**. V. 1, 6 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019.

BELHADJ, B.; HOUSSOU, J.; MONTRELAY, N.; QUÉNEUDEC, M. Effect of substitution of cement by mineral powders on the physicomechanical properties and microstructure of sand concretes. **Journal of Architectural Environment & Structural Engineering Research**, v. 5, n. 4, p. 18–29, 2022. DOI: <https://doi.org/10.30564/jaeser.v5i4.5248>

BETIOLI, A. M.; FORTUNATO, M.; MARTINS, B.-H. R.; CASALI, J. M.; ROCHA, J. C.; COLLODETTI, G. Efeito da composição granulométrica e da área superficial específica de resíduos de polimento de porcelanato em argamassas autoadensáveis. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 20, n. 3, p. 385-402, jul./set. 2020. ISSN 1678-8621 DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212020000300435>

BHAGATH SINGH, G. V. P.; SUBRAMANIAM, K. VL. Direct decomposition Xray diffraction method for amorphous phase quantification and glassy phase determination in binary blends of siliceous fly ash and hydrated cement. **Journal of Sustainable Cement-Based Materials**, v. 6, n. 2, p. 111-125, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1080/21650373.2016.1177478>

BONAVETTI, V.; DONZA H.; RAHHAL V.; IRASSAR E. Influence of initial curing on the properties of concrete containing limestone blended cement. **Journal of Cleaner Production**, v. 30, n. 5, p.703-708, 2020. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00217-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00217-9)

BRASIL. Ministério da Saúde. Gabinete do Ministro. Portaria Nº 888, de 04 de maio de 2021. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017, **para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade**. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-gm/ms-n-888-de-4-de-maio-de-2021-318461562>. Acesso em: 09 de jan. 2024.

BRASIL. Portaria GM/MS n.º 888, de 04 de maio de 2021. **Dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade**. Diário Oficial da República Federativa do Brasil. Brasília, DF, v. 123, n. 123, p. 12345. 2o dez. 2021. Seção 2, pt. 3.

BUENO, C. F. H. **Tecnologia de materiais de construções**. Viçosa, Mg: Universidade Federal de Viçosa, 2000. Disponível em: <https://www.ambiagro.ufv.br/wp-content/uploads/2017/10/Tecnologia-de-Materiais-de-Constru%C3%A7%C3%B5es.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2023.

BURGOS, M.O.; ALONSO, M.M.; PUERTAS, F. Viscosity and water demand of limestone and fly ash-blended cement pastes in the presence of superplasticisers. **Construction and Building Materials**, v.48, p. 417-423, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.008>

CAMPOS, H. F. **Concreto de alta resistência utilizando pó de pedra como substituição parcial do cimento Portland**: estudo experimental. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) - Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações (fundamentos)**. Vol. 1. 6. ed., Rio de Janeiro - RJ: Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., 2007. 234p.

CASTRO, V. G. Cimento Portland. *In*: Compósitos madeira-cimento: um produto sustentável para o Futuro [online]. Mossoró: EdUFERSA, 2021, pp. 13-21. ISBN: 978-65-87108-26-1.

COSTA, C.; CARVALHO, P. A.; BORDADO, J.C.; NUNES, A. Estudo de argamassas de base cimentícia por microscopia electrónica de varrimento. **Ciência e Tecnologia dos Materiais**, v. 21, p. 31-35, 2009.

COX, K. G.; BELL, J. D.; PANKHURST, R. J. 1979. The Interpretation of the Igneous Rocks. **Allen & Unwin. London**. 450pp.

CRAIG, R. F. **Mecânica dos solos**. 7. ed., Rio de Janeiro - RJ: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., 2007. 365p.

DAL MOLIN, D. C. C. Adições minerais para concreto estrutural. *In*: ISAIA, G. C. (ed), **Concreto**: ensino, pesquisa e realizações. 1 ed., p. 345-379, São Paulo: IBRACON. 2005.

DE MARCO JÚNIOR, P.; PAGLIA, A. P. Parte 1: Estatística e interpretação de dados. *In*: **Material de apoio para análises estatísticas**. Goiânia, Abr. 2009. p. 2-22. Disponível em: https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/85/o/Apostila_de_estat%C3%ADstica.pdf. Acesso em: 17 dez. 2024

DORFMAN, Gabriel. **História do Cimento e do Concreto: desde os primórdios até a primeira guerra**. Brasília: Unb, 2003.

DOWNS, R. T.; HALL-WALLACE, M. O banco de dados de estrutura cristalina do mineralogista americano. **American Mineralogist**, v. 88, p. 247-250, 2003.

GLASSER F.P.; DIAMOND S.; ROY D.M. Hydration reactions in cement pastes incorporating fly ash and other pozzolanic materials. **Materials Research Society Symposium Proceedings**. v. 86, p. 167-186, 1987. DOI: <https://doi.org/10.1557/PROC-86-139>

- GOBBO, L. A.. **Aplicação da difração de raios x e método de Rietveld no Estudo de cimento Portland**. 273 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo (Usp), São Paulo, 2009.
- GONÇALVES, J. P.. **Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para produção de concretos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.
- GONÇALVES, J. P. **Desenvolvimento e caracterização de concretos de baixo impacto ambiental e contendo argila calcinada e areia artificial**. Tese (Doutorado) – Rio de Janeiro - RJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.
- GRAŽULIS, S. *et al.* Crystallography Open Database – an open-access collection of crystal structures. **Journal of Applied Crystallography**, v. 42, p. 726-729, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1107/S0021889809016690>.
- GRAŽULIS, S. *et al.* Crystallography Open Database (COD): an open-access collection of crystal structures and platform for world-wide collaboration. **Nucleic Acids Research**, v. 40, p. D420-D427, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1093/nar/gkr900>.
- GRAŽULIS, S.; MERKYS, A.; VAITKUS, A.; OKULIČ-KAZARINAS, M. Computing stoichiometric molecular composition from crystal structures. **Journal of Applied Crystallography**, v. 48, n. 1, p. 85-91, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1107/S1600576714025904>.
- HERMANN, A.; LANGARO, E. A.; LOPES DA SILVA, S. H., et al., Empacotamento de partículas de cimento e sílica ativa em pastas pelo uso de modelo analítico, **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, v. 9, n. 1, pp. 48-65, 2016.
- HOPPE FILHO, J.; GOBBI, A.; PEREIRA, E.; QUARCIONI, V. A.; MEDEIROS, M. H. F. Pozzolanic activity of mineral additions to Portland cement (Part I): Pozzolanic activity index with lime (PAI), X-ray diffraction (XRD), thermogravimetry (TG/DTG) and modified Chapelle. **Revista Matéria**, v. 22, n. 3, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620170003.0207>
- JACOBY, P. C.; PELISSER, F. Pozzolanic effect of porcelain polishing residue in Portland cement. **Journal of Cleaner Production**, v. 100, p. 84- 88, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.096>
- KABEER, K.I.S.A.; VYAS, A.K. Experimental investigation on utilization of dried marble slurry as fine aggregate in lean masonry mortars. **Journal of Building Engineering**, v. 23, p. 185–192, May 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.01.034>
- KARIMI, H.; YU, Q.; BROUWERS, H. J. H. On the effect of the physical structure of cement on shrinkage of cementitious materials. **Matec Web Conferences**. Vol. 199, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819911001>. Acesso: 21/06/2022.
- KUPWADE-PATIL, K.; PALKOVIC, S. D.; BUMAJDAD, A. *et al.*, Use of silica fume and natural volcanic ash as a replacement to Portland cement: Micro and pore structural investigation using NMR, XRD, FTIR and X-ray microtomography, **Construction and**

Building Materials, v. 158, p. 574- 590, Jan. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.165>

KWAN, A. K. H.; NG, P. L.; HUEN, K. Y. Effects of fines content on packing density of fine aggregate in concrete. **Construction And Building Materials**, n. 61, p.270-277, abr. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.03.022>

LE BAS, M. J.; LE MAITRE, R. W.; STRECKEISEN, A.; ZANETTIN, B. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali – silica diagram. **Journal of Petrology**, v. 27, n. 3, p. 745-750, 1986. DOI: <https://doi.org/10.1093/petrology/27.3.745>

LI, L.G.; ZENG, K.L.; OUYANG, Y.; KWAN, A. K. H., Basalt fibre-reinforced mortar: rheology modelling based on water film thickness and fibre content. **Construction and Building Materials**, v. 229, p. 116857, Dec. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116857>

LIU, H.; SUN, Q.; WANG, B.; WANG, P.; ZOU, J. Morphology and Composition of Microspheres in Fly Ash from the Luohuang Power Plant, Chongqing, Southwestern China. **Minerals**. v. 6, p. 30, 2016. DOI: <https://doi.org/10.3390/min6020030>

LISBOA, E. S.; ALVES, E. S.; MELO, G. H. A. G. **Materiais de construção: concreto e argamassa**. 2.ed. Porto Alegre: SAGAH, 2017.

LOPES, Livia de Faria. **Materiais de construção civil I**. Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2017. 193 p.

MACHADO, F. B.; NARDY, A. J. R.; ROCHA JUNIOR, E. R. V.; MARQUES, L. S.; OLIVEIRA, M. A. F. D. Geologia e litogeoquímica da Formação Serra Geral nos estados de Mato grosso e Mato Grosso do Sul. **Geociências**, São Paulo, v. 28, n. 4, p. 523-540, 2009.

MATTA, Vanessa Ribeiro Peixoto da *et al.* Efeitos da adição do resíduo de corte de mármore e granito (RCMG) no desempenho de argamassas de cimento Portland no estado endurecido. **Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista**, [S. l.], v. 9, n. 1, 2013. DOI: <https://doi.org/10.17271/19800827912013597>

MEDEIROS, M. H. F.; RAISDORFER, J. W.; HOPPE FILHO, J.. Influência da sílica ativa e do metacaulim na velocidade de carbonatação do concreto: relação com resistência, absorção e relação a/c. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 4, p. 125-139, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212017000400189>

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais**. 3 ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MERKYS, A. *et al.* COD:CIF:Parser: um analisador CIF de correção de erros para a linguagem Perl. **Journal of Applied Crystallography**, v. 49, n. 1, p. 292-301, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1107/S1600576715022396>.

MERKYS, A. *et al.* Algoritmo baseado em isomorfismo de gráfico para verificação cruzada de descrições químicas e cristalográficas. **Journal of Cheminformatics**, v. 15, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13321-023-00692-1>.

MORAIS, B. B. *et al.* Análise das propriedades do concreto com variação dos tipos de cimento. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, ano 05, ed. 05, v. 01, p. 05-25, maio 2020. Disponível em:
<https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/tipos-de-cimento>. Acesso em: 05/01/2024.

MOTOKI, A.. **Apostila didática para a disciplina Petrologia I: Descrição Petrográfica de Rochas Ígneas**. Rio de Janeiro: Departamento de Mineralogia e Petrologia Ígnea, Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), 2004. 4 v.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5.ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. 2.ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

NOBREGA, A.K.C *et al.* Caracterização do resíduo de pó de pedra ornamental adicionado à argamassa em substituição parcial ao cimento. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA*, 20., 2014, Florianópolis- SC. Anais eletrônicos [...]. Florianópolis- SC: Associação Brasileira de engenharia química, 2014.

NUNES, V. S. **Avaliação do efeito da substituição parcial do cimento por resíduo de calcário nas propriedades mecânicas e térmicas de concretos leves**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2020.

ODLER, I. Hydration, setting and hardening of Portland cement. *In: LEA, F. M. The chemistry of cement and concrete*. 4. ed. [S.l.]: Elsevier, 2003. p. 157-250.

OLIVEIRA, Leonardo Soares de. **Metaestabilidade estrutural do sistema Ni-Ti-Ge induzida por mechanical alloying**. 2017. 75 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Amazonas. Manaus, 2017.

PAYA, J.; BORRACHERO, M.V.; MELLADO, A., ORDONEZ.L.M. Determination of amorphous sílica in rice husk ash by a rapid analytical method. **Cement and Concrete Research**. v. 31, p.227-231. 2001. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00466-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00466-X)

PEDROSO, F.L. Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem. **Concreto & Construções**, São Paulo, n. 53, p. 14-19, jan./mar. 2009. Disponível em:
http://ibracon.org.br/publicacoes/revistas_ibracon/rev_construcao/pdf/revista_concreto_53.pdf. Acesso em: 09/08/2023

QUEIROZ, R, C. **Geologia e geotécnica básica para engenharia civil**. São Paulo: Blucher, 2016.

QUIRÓS, M. *et al.* Usando strings SMILES para a descrição da conectividade química no Crystallography Open Database. **Journal of Cheminformatics**, v. 10, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13321-018-0279-6>.

RAISI, E. M.; AMIRI, J. V.; DAVOODI, M. R. Mechanical performance of self-compacting concrete incorporating rice husk ash. **Construction and Building Materials**. v. 177, p. 148–157, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.053>

RAHHAL V.; TALERO R., Early hydration of portland cement with crystalline mineral additions. **Cement and Concrete Research**. v. 35, p. 1285 – 1291, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.12.001>

RÊGO, João Henrique da Silva. **As cinzas de casca de arroz (CCAs) amorfa e cristalina como adição mineral ao cimento: aspectos de microestrutura das pastas**. 2004. 301 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil e Ambiental, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília - DF, 2004.

RIBEIRO, A. V. S.; PRUDENCIO, L. R.; KIOURANIS J R. A.; DE VASCONCELOS, A. T.; MATOS, P. R. **Influência de adições minerais nas propriedades da argamassa**. Ibracon. Foz de Iguaçu, p. 14, 2018.

RIBEIRO, A. V. S., *et al.* Influência de adições minerais na elevação da temperatura de concretos massa de elevada resistência à compressão. **Matéria** (Rio de Janeiro), v. 26, n. 1, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620210001.1215>

ROSSETTI, L.; LIMA, E. F.; WAICHEL, B. L.; HOLE, M. J.; SIMÕES, M. S.; SCHERER, C. M. S. Lithostratigraphy and volcanology of the Serra Geral Group, Paraná-Etendeka Igneous Province in Southern Brazil: Towards a formal stratigraphical framework. **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, v. 355, p. 98–114, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.05.008>

SAMAE. Serviço Autônomo Municipal de Água e Esgoto de Caxias do Sul/RS.

SANTIAGO, C. **Argamassas tradicionais de cal [online]**. Salvador: EDUFBA, 2007. 202 p. ISBN 978-85-232-0471-6. Available from SciELO Books.

SANTOS, G. R. S.; APOLINÁRIO, E. C. A.; RIBEIRO, D. V.. Influência da adição do resíduo de corte de mármore e granito (RCMG) na reologia das argamassas. **Periódico Eletrônico IX Fórum Ambiental da Alta Paulista**, [S.l.], v. 9, n. 1, p. 70-86, 2013.

SARAYA, M.E., Study physico-chemical properties of blended cements containing fixed amount of silica fume, blast furnace slag, basalt and limestone, a comparative study. **Construction and Building Materials**, v. 72, p. 04–112, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.071>

SCHERER, C.; LIMA, L. F. de; ZORZI, J. E. Effect of partial replacement of cement by fine powders on the corrosion resistance of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 401, p. 132982, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132982>

SHAHRIAR, A.; NEHDI, M. L. Optimization of rheological properties of oil well cement slurries using experimental design. **Materials and Structures**, v. 45, n. 9, p. 1403-1423, Feb. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9841-2>

SIDDIQUE, S.; JANG, J. G.. Assessment of molybdenum mine tailings as *filler* in cement mortar. **Journal of Building Engineering**, [S.l.], v. 31, p. 1-8, Setp. 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101322>.

SILVA, J. P.; SANTOS, Y. R.; BELLO, M. I. M.. Aplicação da ANOVA e dos testes de Fisher e Tukey em dados de recalque de edifícios de múltiplos pavimentos. **Principia**, [s. l.], v. 59, n. 3, p. 829-845, 30 set. 2022.

SILVA, K. D. do C. **Avaliação da atividade pozolânica dos resíduos de lâ de rocha, fibra de vidro e lâ de vidro**. Ouro Preto, 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.

SIQUEIRA, W. F.; HENTGES, T. I. Estudo de concreto de alto desempenho com utilização de fíler basáltico e fíler cerâmico. *In*: 62º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. Florianópolis. Anais [...]. IBRACON, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.155>

SINGH, M.; SRIVASTAVA, A.; BHUNIA, D.. An investigation on effect of partial replacement of cement by waste marble slurry. **Construction and Building Materials**, v. 134, p. 471-488, 2017.

SOUZA, A. J.; PINHEIRO, B. C. A.; HOLANDA, J. N. F. Efeito da adição de resíduo de rocha ornamental nas propriedades tecnológicas e microestrutura de piso cerâmico vitrificado. **Cerâmica**, São Paulo, v. 57, p. 212-218, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0366-69132011000200013>

SPEAKMAN, S.. A. Profile fitting for analysis of XRPD data using highscore plus v3. **Massachusetts institute of technology: Center For Materials Science And Engineering At Mit**, Massachusetts, 2012. 57 slides, color.

TAYLOR, H.F.W. (1997) *Cement Chemistry*. 2nd Edition, Thomas Telford Publishing, London, 361. <http://dx.doi.org/10.1680/cc.25929>

VARDHAN, K. *et al.* Mechanical properties and microstructural analysis of cement mortar incorporating marble powder as partial replacement of cement. **Construction and Building Materials**, v. 96, p. 615-621, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.071>

VAITKUS, A.; MERKYS, A.; GRAŽULIS, S. Validation of the crystallography Open Database using the Crystallographic Information Framework. **Journal of Applied Crystallography**, v. 54, n. 2, p. 661-672, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1107/S1600576720016532>.

VAITKUS, A. *et al.* A workflow for deriving chemical entities from crystallographic data and its application to the Crystallography Open Database. **Journal of Cheminformatics**, v. 15, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13321-023-00780-2>.

VILLAR-COCIÑA, E. *et al.* A comparative study on the pozzolanic activity between bamboo leaves ash and silica fume: kinetic parameters. Fume: Kinetic Parameters. **Waste and Biomass Valorization**. v. 11, p. 1627–1634, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12649-018-00556-y>

WERNICK, Eberhard. **Rochas magmáticas: conceitos fundamentais e classificação modal, química, termodinâmica e tectônica**. Rio de Janeiro, ed. Unesp, p. 336, 2003.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT, (WBCSD). The cement sustainability initiative, our agenda for action. 2002.

YAHIA, A.; TANIMURA, M.; SHIMOYAMA, Y. Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone *filler*-effect of powder content and w/c ratio. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 3, p. 532-539, 2005, DOI: 10.1016/j.cemconres.2004.05.008.

ZHAO, Z.; REMOND, S.; DAMIDOT, D.; XU, W. Influence of fine recycled concrete aggregates on the properties of mortars. **Construction and Building Materials**, v. 81, p. 179-186, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.037>