

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO
GRANDE DO NORTE – IFRN**

DJALMA VALÉRIO RIBEIRO NETO

**EFEITO DA UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DE ROCHAS ORNAMENTAIS
DO SERIDÓ POTIGUAR NAS PROPRIEDADES DE ARGAMASSA
AUTONIVELANTE**

**NATAL
2023**

DJALMA VALÉRIO RIBEIRO NETO

**EFEITO DA UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DE ROCHAS ORNAMENTAIS
DO SERIDÓ POTIGUAR NAS PROPRIEDADES DE ARGAMASSA
AUTONIVELANTE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Uso Sustentável de Recursos Naturais do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, em cumprimento às exigências legais como requisito Parcial/Cumprimento à obtenção do título de **Mestre em Ciências Ambientais**, na linha de pesquisa de Sustentabilidade e Gestão dos Recursos Naturais.

Orientador: Prof^o. Dr. Júlio César de Pontes

Coorientadora: Prof^a. Dra. Ariadne de Souza Silva

NATAL
2023

Ribeiro Neto, Djalma Valério.
R484e Efeito da utilização de resíduos sólidos de rochas ornamentais do Seridó potiguar nas propriedades de argamassa autonivelante / Djalma Valério Ribeiro Neto. – 2023.
105 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Natal, 2023.

Orientador: Júlio César de Pontes.

Coorientadora: Ariadne de Souza Silva.

1. Meio ambiente – Resíduos sólidos - Sustentabilidade. 2. Pó da rocha ornamental. 3. Efeito filler. 4. Adição mineral. 5. Material cimentício. I. Título.

CDU 502/504:628.4

DJALMA VALÉRIO RIBEIRO NETO

**EFEITO DA UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DE ROCHAS ORNAMENTAIS
DO SERIDÓ POTIGUAR NAS PROPRIEDADES DE ARGAMASSA
AUTONIVELANTE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Uso Sustentável de Recursos Naturais do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, em cumprimento às exigências legais como requisito Parcial/Cumprimento à obtenção do título de **Mestre em Ciências Ambientais**, na linha de pesquisa de Sustentabilidade e Gestão dos Recursos Naturais.

Aprovado em 05 de setembro de 2023.

BANCA EXAMINADORA

Júlio Cesar de Pontes.

Prof^o. Dr. Júlio Cesar de Pontes – Orientador
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte

Ariadne de Souza Silva

Prof^a. Dra. Ariadne de Souza Silva – Coorientadora
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte

Josyanne P. Giesta.

Prof^a. Dra. Josyanne Pinto Giesta
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte

Josyanne P. Giesta

Prof^o. Dr. Tércio Graciano Machado
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte

Raimison Bezerra de Assis

Prof^o. Dr. Raimison Bezerra de Assis
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia

Dedico a minha mãe, Margareth Costa de Moura, e meus irmãos, Gabriel Costa Ribeiro e Pedro Henrique Costa Ribeiro. E a todos, todas e todes que lutam pela igualdade no Brasil.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por caminhar sempre ao meu lado e me fortalecer em toda a minha trajetória, não me deixando desamparado.

Ao Professor Dr. Júlio César de Pontes, por total atenção na orientação deste trabalho, sempre me alertando e cuidando para que a pesquisa fosse desenvolvida com êxito e em tempo hábil.

À Professora Dra. Ariadne de Souza Silva, por total dedicação, paciência e delicadeza na coorientação deste trabalho, estando sempre, de maneira irrestrita, disposta a contribuir.

Ao Programa de Pós-Graduação em Uso Sustentável de Recursos Naturais do Instituto Federal do Rio Grande do Norte – *Campus* Natal-Central, o qual, através de todos (as) os professores (as), contribuiu na construção desta obra.

À empresa Thor Granitos e Mármore LTDA., pela disponibilização do resíduo e fornecimento de informações durante o trabalho.

À técnica de laboratório Nathana Luiza Pinto de Lima, em nome da Diretoria Acadêmica de Construção Civil do IFRN *Campus* Natal-Central, pela disponibilização dos Laboratórios para desenvolvimento dos experimentos laboratoriais.

Ao Professor Dr. Tércio Graciano Machado, pela companhia e orientação em toda essa jornada, além de ser um grande inspirador com a sua dedicação profissional e talento na pesquisa.

Ao Prof. Dr. Rafael Alexandre Raimundo, pós-doutor da Universidade Federal da Paraíba, pela viabilização das análises de DRX e granulometria a laser na Universidade Federal da Paraíba.

Ao pesquisador Anderson Costa Marques, estudante de pós-graduação no Programa de Ciência e Engenharia de Materiais (PPgCEM) da UFRN, pela ajuda nos gráficos de DRX.

Ao Grupo de Pesquisa em Processamento Mineral, uma parceria interinstitucional que contribui com a ciência de maneira ímpar, com grande atuação para o aproveitamento de resíduos.

Ao Prof. Dr. João Batista Monteiro de Sousa, pela contribuição significativa na minha formação acadêmica desde o meu curso técnico em mineração.

Ao Professor Msc. Mauro Froes Meyer, por ter me recebido de maneira positiva e me dado total liberdade para o desenvolvimento do meu trabalho no

Laboratório de Tecnologia Mineral e Materiais (LT2M) do IFRN *Campus* Natal-Central. E ao meu chefe imediato nesse período, Prof. Msc. Alexandre Lúcio Dantas, por total compreensão, apoio e parceria.

A todos e todas do Laboratório de Tecnologia Mineral e Materiais (LT2M) que me apoiaram em todas as etapas do Mestrado Profissional para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais. E, em especial, aos meus bolsistas Kennedy Alef Fonseca Antunes, Marina Silva Maciel e Maria Raquel de Moreno Pereira pela ajuda no desenvolvimento dos procedimentos experimentais.

À Dra. Daiane Cristina Ferreira Golbert, pesquisadora no Instituto do Cérebro da UFRN, pelo incentivo na pesquisa e ajuda na produção do pré-projeto de seleção do mestrado.

Ao meu parceiro, Dr. Flánelson Maciel Monteiro, pela companhia diária, paciência, compreensão e total apoio na minha trajetória acadêmica, acompanhando-me em todos os passos.

A minha mãe, Margareth Costa de Moura, por me apoiar, incentivar e me amar incondicionalmente. Mulher forte, inspiradora e que caminha ao meu lado. Amo-a. E aos meus irmãos, Gabriel Costa Ribeiro e Pedro Henrique Costa Ribeiro, pelo amor que sentimos uns pelos outros.

“Quebrando pedras

E plantando flores

Entre pedras que me esmagavam

Levantei a pedra rude dos meus versos”.

(CORA CORALINA).

“Ah, comigo o mundo vai modificar-se. Não

gosto do mundo como ele é”.

(CAROLINA MARIA DE JESUS).

RIBEIRO NETO, D.V.

EFEITO DA UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DE ROCHAS ORNAMENTAIS DO SERIDÓ POTIGUAR NAS PROPRIEDADES DE ARGAMASSA AUTONIVELANTE

RESUMO

A indústria mineral voltada à extração de rochas ornamentais impacta positivamente na economia do Seridó Norte Rio-grandense. Entretanto, por se tratar de uma extração mineral, recurso natural não renovável, existe um paradoxo entre manter a economia funcionando e, por sua vez, o meio ambiente em equilíbrio para as presentes e futuras gerações, como previsto na Constituição Federal. Sabendo-se que no processo de extração e beneficiamento dessa matéria-prima ocorre a geração de resíduos sólidos, dentre eles o pó de rocha, esta pesquisa busca mitigar os impactos ambientais através da reutilização desse resíduo; utilizando-o na produção de argamassa autonivelante, estando em consonância com a Agenda 2030 através dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável. As argamassas autonivelantes são compósitos cimentícios com características particulares de espalhamento através do seu próprio peso, com alta viscosidade, baixa segregação e sem exsudação. Nesse contexto, foi avaliado o efeito da adição de 10, 20 e 30% do resíduo pó de rocha ornamental (RPRO), resultante do processo de beneficiamento como matéria-prima de argamassas autonivelantes, particularmente nas suas propriedades reológicas, físico-mecânicas e microestruturais. O RPRO utilizado é oriundo do município de Parelhas-RN, o qual, após coletado, realizou-se a preparação da amostra para a caracterização físico-química e microestrutural através dos ensaios de fluorescência de raios-X (FRX), granulometria a laser, difração de raios-X (DRX), microscopia eletrônica de varredura (MEV), índice de finura, área superficial específica, volume do poro e índice de atividade pozolânica com cimento Portland; bem como as caracterizações do aglomerante e agregado miúdo. Posteriormente, foi analisado o índice de atividade pozolânica do resíduo que foi adicionado através de suas caracterizações iniciais e do ensaio de índice de atividade pozolânica com cimento Portland aos 28 dias. Foram feitos os ensaios com e sem adição do resíduo, caracterizando-os através de suas propriedades reológicas (estado fresco), físico-mecânicas e microestruturais (estado endurecido). Para o primeiro, avaliou-se o mini slump, mini funil-V, caixa L e retenção de fluxo. Já no estado endurecido, massa específica, absorção de água por capilaridade, absorção de água por imersão, índice de vazios, resistência à compressão, DRX e MEV. Como resultado, o resíduo – pó de rocha ornamental – atuou como fíler na argamassa autonivelante, melhorando a trabalhabilidade, viscosidade e fluidez no estado fresco, possuindo característica de modificador de viscosidade. No estado endurecido, as composições apresentaram baixas absorções de água por capilaridade e por imersão, redução no índice de vazios e elevada resistência à compressão, sendo os traços com adição de 10%p. e 20p. classificados como de alta resistência mecânica para pisos, de acordo com a NBR 11801:2012, com valores superiores a 40Mpa. Assim, obteve-se na pesquisa uma argamassa autonivelante com adição de RPRO com potencial de aplicação na indústria de construção civil, com destaque para a adição de 10%p. que obteve os melhores resultados; além de contribuir com o desenvolvimento sustentável.

Palavras-chave: Pó de rocha ornamental; Efeito fíler; Adição mineral; Sustentabilidade; Material cimentício.

RIBEIRO NETO, D.V.

EFFECT OF THE USE OF SOLID WASTE FROM ORNAMENTAL ROCKS FROM THE SERIDÓ POTIGUAR ON THE PROPERTIES OF SELF-LEVELING MORTAR

ABSTRACT

The mineral industry focused on the extraction of dimension stones has a positive impact on the economy of Seridó Norte Rio Grande. However, because it is a mineral extraction, a non-renewable natural resource, there is a paradox between keeping the economy functioning and, in turn, the environment in balance for present and future generations, as provided for in the Federal Constitution. Knowing that in the process of extracting and processing this raw material, solid waste is generated, including rock dust, this research seeks to mitigate the environmental impacts through the reuse of this waste; using it in the production of self-levelling mortar, in line with the 2030 Agenda through the Sustainable Development Goals. Self-levelling mortars are cementitious composites with particular spreading characteristics through their own weight, with high viscosity, low segregation and no exudation. In this context, the effect of adding 10, 20 and 30% of ornamental rock powder residue (RPRO), resulting from the improvement process as a raw material for self-levelling mortars, was evaluated, particularly in its rheological, physical-mechanical and microstructural properties. The RPRO used comes from the municipality of Parelhas-RN, which, after being collected, the sample was prepared for the physical-chemical and microstructural characterization through X-ray fluorescence tests (FRX), laser granulometry, X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), fineness index, specific surface area, pore volume and pozzolanic activity index with Portland cement; as well as the characterization of the binder and fine aggregate. Subsequently, the pozzolanic activity index of the residue that was added was analyzed through its initial characterizations and the pozzolanic activity index test with Portland cement at 28 days. Tests were carried out with and without addition of residue, characterizing them through their rheological (fresh state), physical-mechanical and microstructural (hardened state) properties. For the first one, the mini slump, mini funnel-V, box L and flow retention were evaluated. Already in the hardened state, specific mass, water absorption by capillarity, water absorption by immersion, voids index, compressive strength, XRD and SEM. As a result, the residue – ornamental rock dust – acted as a filler in the self-levelling mortar, improving workability, viscosity and fluidity in the fresh state, having the characteristic of a viscosity modifier. In the hardened state, the compositions showed low water absorption by capillarity and by immersion, reduction in the voids index and high compressive strength, with the mixes with addition of 10%p. and 20%p. classified as of high mechanical resistance for floors, according to NBR 11801:2012, with values greater than 40Mpa. Thus, the research obtained a self-leveling mortar with the addition of RPRO with potential for application in the civil construction industry, with emphasis on the addition of 10% p. which obtained the best results; in addition to contributing to sustainable development.

Keywords: Ornamental rock dust; Filler effect; Mineral addition; Sustainability; Cementitious material.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Objetivos do Desenvolvimento Sustentável da Agenda 2030.....	17
Figura 2 –	Representação da microestrutura da pasta da argamassa autonivelante.....	21
Figura 3 –	Porcentagem, por região, de TCCs nos programas de pós-graduação brasileira no período de 2018 a 2022.....	28
Figura 4 –	Fluxograma do procedimento experimental.....	31
Figura 5 –	Mapa de localização do município de Parelhas-RN (local de coleta do RPRO).....	34
Figura 6 –	RPRO no galpão da empresa Thor Mármore e Granitos LTDA.....	37
Figura 7 –	Homogeneização em pilha longitudinal do RPRO.....	36
Figura 8 –	Ensaio de massa específica no frasco de Le Chatelier do RPRO.....	37
Figura 9 –	DRX do resíduo pó de rocha ornamental (RPRO).....	39
Figura 10 –	Distribuição do tamanho de partícula (A) e microscopia eletrônica de varredura (B) do RPRO.....	40
Figura 11 –	Distribuição do tamanho de partícula (A) e micrografia eletrônica de varredura (B) do cimento Portland CP V-ARI.....	42
Figura 12 –	DRX do cimento Portland CP V-ARI.....	44
Figura 13 –	Ensaio de massa específica do agregado miúdo.....	45
Figura 14 –	Gráfico de distribuição granulométrica e zonas estabelecidas na NBR NM 7211(ABNT, 2009) (A) e microscopia eletrônica de varredura (MEV) do agregado miúdo (B).....	46
Figura 15 –	Representação do mini slump test e mini funil-V.....	50
Figura 16 –	Anel de fluxo utilizado com dimensões da ASTM C1708 (2012).....	51
Figura 17 –	Procedimento experimental para obtenção da massa específica, índice de vazios e absorção de água.....	52
Figura 18 –	Distribuição granulométrica do RPRO e cimento Portland CP V-ARI.....	56
Figura 19 –	Valores de resistência à compressão do ensaio de determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias.....	57
Figura 20 –	Diâmetros de escoamento obtidos através do ensaio de mini slump test.....	58
Figura 21 –	Tempo de escoamento cronometrado no ensaio de mini slump test.....	59
Figura 22 –	Tempo de fluxo de queda cronometrado no ensaio de mini funil V..	60

Figura 23 – Índice de estabilidade visual dos traços referência das argamassas autonivelantes produzidas.....	61
Figura 24 – Índice de estabilidade visual dos traços com adição de RPRO das argamassas autonivelantes produzidas.....	62
Figura 25 – Resultado do ensaio de caixa L adaptado.....	63
Figura 26 – Comportamento de retenção de fluxo ao longo do tempo pelas argamassas autonivelantes.....	65
Figura 27 – Resultados da resistência à compressão aos 7, 14 e 28 dias.....	67
Figura 28 – Absorção de água por capilaridade das argamassas autonivelantes.....	69
Figura 29 – Absorção de água e índice de vazios das argamassas autonivelantes.....	70
Figura 30 – Difratomogramas dos traços de referência.....	72
Figura 31 – Difratomogramas dos traços 20%p. e 30%p.....	73
Figura 32 – Micrografias eletrônicas (MEV-FEG) das argamassas sem adição mineral (0% e 0% + VMA).....	75
Figura 33 – Micrografias eletrônicas das argamassas com adição mineral de RPRO (10%p., 20%p. e 30%p).....	76
Figura 34 – Mapeamento por EDS da argamassa 0% + VMA. MEV-FEG (A), intensidade dos picos (B) e mapeamento (C).....	77

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 1 –	Limites de composição do cimento Portland (porcentagem de massa).....	22
Quadro 2 –	Limites normatizados do agregado miúdo.....	23
Quadro 3 –	Teses e dissertações dos programas de pós-graduação <i>stricto sensu</i> desenvolvidos no Brasil com a temática de adição mineral em argamassas (2018 a 2022).....	25
Quadro 4 –	Laboratórios utilizados para o desenvolvimento da pesquisa.....	32
Quadro 5 –	Caracterização física do RPRO.....	37
Quadro 6 –	Análise de fluorescência de raios-X do resíduo pó de rocha ornamental (RPRO).....	38
Quadro 7 –	Caracterização física do Cimento Portland CP V-ARI.....	42
Quadro 8 –	Composição química do cimento portland CP V-ARI.....	43
Quadro 9 –	Caracterização física do agregado miúdo – areia fina.....	47
Quadro 10 –	Traços adotados no trabalho.....	48
Quadro 11 –	Percentual de elementos químicos para materiais pozolânicos (NBR 12653 (ABNT, 2014)) e RPRO	55
Quadro 12 –	Resultado do ensaio de retenção de fluxo.....	64
Quadro 13 –	Resultados dos ensaios das propriedades no estado fresco.....	66
Tabela 1 –	Médias das resistências à compressão e seus respectivos desvios padrão.....	68
Tabela 2 –	Massa específica das argamassas estudadas.....	71

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas;
ASTM – American Society for Testing and Materials
Au – Ouro;
BET – Brunauer, Emmett e Teller;
DRX – Difração de Raios-X;
EDS – Espectroscopia por Dispersão de Energia
Efnarc – European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems;
EN – European Standard;
ESG – Environmental, Social and Governance;
FRX – Fluorescência de Raios-X;
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística;
IAP – Índice de Atividade Pozolânica;
ICMS – Imposto Sobre Circulação de Mercadorias e Serviços;
IEV – Índice de Estabilidade Visual;
Kg – Quilograma;
LT2M – Laboratório de Tecnologia Mineral e Materiais;
MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura;
mm – milímetros;
NBR – Norma Brasileira;
NM – Norma Mercosul;
ODS – Objetivos do Desenvolvimento Sustentável;
ONU – Organização das Nações Unidas;
PIB – Produto Interno Bruto;
RPRO – Resíduo Pó de Rocha Ornamental;
SP – Superplastificante
VMA – Aditivo Modificador de Viscosidade;
% – Porcentagem;
%p. – Percentual em peso;
°C – Grau Celsius;
0% - Traço sem adição;
0% + VMA – Traço com adição de modificador de viscosidade;

10%p. – Traço com 10% de adição de RPRO em peso;

20%p. – Traço com 20% de adição de RPRO em peso;

30%p. – Traço com 30% de adição de RPRO em peso.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVO GERAL	13
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
1.3	JUSTIFICATIVA	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1	DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E FATORES ESG	16
2.2	A INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS, CONSTRUÇÃO CIVIL E A ECONOMIA	17
2.3	ARGAMASSA	18
2.4	ARGAMASSA AUTONIVELANTE	19
2.4.1	Elementos constituintes e características	20
2.4.1.1	Cimento	22
2.4.1.2	Agregado miúdo	23
2.5	ADIÇÃO MINERAL EM ARGAMASSAS	24
3	METODOLOGIA	30
3.1	LABORATÓRIOS ENVOLVIDOS NO DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA	32
3.2	MATERIAIS DE PARTIDA	33
3.2.1	Resíduo pó de rocha ornamental (RPRO)	33
3.2.1.1	Coleta do resíduo e preparação da amostra	34
3.2.1.2	Caracterização física do resíduo pó de rocha ornamental	36
3.1.1.3	Caracterização química do resíduo pó de rocha ornamental	38
3.1.1.4	Caracterização estrutural do resíduo por de rocha ornamental	38
3.2.1.5	Caracterização granulométrica e morfológica do RPRO	39
3.2.1.6	Índice de atividade pozolânica do RPRO	40
3.2.2	Aglomerante – Cimento Portland CP V-ARI	41
3.2.2.1	Caracterização física do cimento Portland CP V-ARI	41
3.2.2.2	Caracterização química do cimento Portland CP V-ARI	43
3.2.2.2	Caracterização estrutural do cimento Portland CP V-ARI	43
3.2.3	Agregado Miúdo – Areia fina	44

3.2.3.1	Caracterização física da areia fina	45
3.2.4	Água	47
3.2.5	Aditivos químicos	47
3.2.5.1	Aditivo superplastificante (SP)	47
3.2.5.2	Aditivo modificador de viscosidade (VMA)	47
3.3	DEFINIÇÃO DOS TRAÇOS	48
3.4	ENSAIOS NO ESTADO FRESCO	49
3.4.1	Consistência e tempo de fluxo e índice de estabilidade visual	49
3.4.2	Retenção de fluxo	51
3.4.3	Ensaio de Caixa L	51
3.5	ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO	52
3.5.1	Massa específica, índice de vazios e absorção de água	52
3.5.2	Absorção por capilaridade e coeficiente por capilaridade	53
3.5.3	Determinação da resistência à compressão	53
3.5.4	Difração de Raios-X (DRX) da argamassa autonivelante	54
3.5.5	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da argamassa autonivelante	54
3.6	PRODUTO TÉCNICO	54
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
4.1	AVALIAÇÃO DE ATIVIDADE POZOLÂNICA DE RPRO ATRAVÉS DE SUAS CARACTERÍSTICAS INICIAIS (QUÍMICAS, ESTRUTURAIS E MECÂNICAS)	55
4.2	EFEITO DA ADIÇÃO DE RPRO NAS PROPRIEDADES DA ARGAMASSA AUTONIVELANTE NO ESTADO FRESCO	58
4.3	EFEITO DA ADIÇÃO DE RPRO NAS PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS AUTONIVELANTES NO ESTADO ENDURECIDO	66
5	CONCLUSÕES	77
	REFERÊNCIAS	80
	APÊNDICE	90
	ANEXO	100

1 INTRODUÇÃO

Desde o descobrimento do Brasil, o País esteve atrelado a atividades que envolviam o extrativismo, destacando-se o extrativismo mineral com a característica de alteração drástica do ambiente onde é promovido (Brasil, 2001). Para Oliveira e Lange (2005), a mineração é responsável por gerar resíduos em todo o seu processo produtivo, desde a extração até as suas disposições finais.

No Rio Grande do Norte a diversidade mineral contribui fortemente para o desenvolvimento da economia local, sendo o Seridó Potiguar representado principalmente pelas minerações de scheelita, caulim, feldspato, rochas ornamentais, dentre outros (Rio Grande do Norte, 2021). O Estado apresenta um bom potencial para a produção de rocha ornamental em sua diversidade de cores e texturas (Dantas; Pereira; Lima, 2020), sendo um produto amplamente usado na construção civil. Por outro lado, estando o Seridó Potiguar localizado no semiárido brasileiro, acaba enfrentando os efeitos da desertificação, que são potencializados com a atividade mineradora.

Segundo Pontes *et al.* (2020), pouca ou nenhuma atenção tem sido dada a extração de rochas graníticas, amplamente usadas na construção civil, em relação a um processo operacional com foco em economia circular. Tratando-se de um recurso natural não renovável e considerando a geração de resíduos provocada pela indústria mineral de rochas ornamentais e a sua relação com a construção civil, tem-se um paradoxo entre manter a economia funcionando e na contramão manter o meio ambiente equilibrado para as presentes e futuras gerações; como previsto na Constituição Federal.

Nessa perspectiva, estudos já foram realizados a respeito da reutilização do resíduo pó de rocha ornamental (RPRO) na produção de materiais para a construção civil (Vinco *et al.* 2016; Mittri *et al.* 2018; Chaves 2019; Mendonça *et al.* 2021).

A reutilização de RPRO incorporado em argamassas, por exemplo, já é estudada desde a década de 1990 no Brasil. Segundo Calmon *et al.* (1997), a

substituição da cal por resíduo induz a pensar que o resíduo está funcionando como um fíler, diminuindo a porosidade entre as misturas e, conseqüentemente, agregando vantagem à resistência. Para Scolaro e Rocha (2021), a utilização de fílers minerais de calcário, basalto e quartzo em argamassa autonivelante, por exemplo, proporciona uma melhor fluidez da mistura e contribuição para o desenvolvimento da resistência inicial. De acordo com Sato, Galina e Teixeira (2018), o resíduo de rochas ornamentais pode ser utilizado como adição mineral inerte em argamassas autonivelantes.

Assim, a conjuntura apresentada nesta pesquisa surge como uma oportunidade de alinhamento com a Agenda 2030, conforme é explicitada pelo Governo do Distrito Federal (2022) como:

“Um apanhado de metas norteadores e perspectivas definidos pela ONU para atingirmos a dignidade e a qualidade de vida para todos os seres humanos do planeta, sem comprometer o meio ambiente, e, conseqüentemente, as gerações futuras.” (Governo do Distrito Federal, 2022).

Atrelado a cinco itens dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável, de acordo com as Nações Unidas no Brasil (2022), esta pesquisa se alinha com as seguintes metas: 9 – Indústria, inovação e infraestrutura; 11 – Cidades e comunidades sustentáveis; 12 – Consumo e produção responsáveis; 15 – Vida terrestre e 17 – Parcerias e meio de implementação.

Nessa perspectiva pretende-se avaliar os efeitos da adição do resíduo - pó de rocha ornamental na produção de argamassa autonivelante com o objetivo de apresentar um material com características e propriedades técnicas adequadas para o mercado e, conseqüentemente, contribuir com o desenvolvimento sustentável.

1.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o efeito da adição do resíduo pó de rocha ornamental, proveniente do Seridó Potiguar, nas propriedades de argamassa autonivelante, contribuindo com o avanço da economia circular na mineração e, conseqüentemente, com os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável propostos na Agenda 2030 da ONU.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Procurando atender o objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Analisar o índice de atividade pozolânica do resíduo pó de rocha ornamental, oriundo do processo de beneficiamento, através de suas caracterizações iniciais (físico-química, estrutural e mecânica);
- Avaliar as propriedades reológicas das argamassas autonivelantes com diferentes percentuais de adição de resíduo (10, 20 e 30%), em peso, no estado fresco;
- Verificar a influência da adição de resíduo (10, 20 e 30%), em peso, nas propriedades físico-mecânicas, estruturais e microestruturais das argamassas autonivelantes no estado endurecido;
- Construir através das análises discursivas um relatório técnico conclusivo como produção técnica do projeto de pesquisa do PPgUSRN, sendo uma proposta alternativa para o uso de resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais.

1.3 JUSTIFICATIVA

A utilização de recursos naturais através da atividade de mineração sempre esteve atrelada a sociedade, proporcionando a produção de materiais e insumos responsáveis por contribuir com o desenvolvimento da sociedade. Tal fato ganhou notoriedade durante o período da revolução industrial, entre os séculos XVIII e XIX, marcado pela produção e consumo desenfreados. Contudo, acendeu o alerta de incompatibilidade entre meio ambiente equilibrado e o desenvolvimento econômico característico à época, surgindo a necessidade do desenvolvimento sustentável.

A indústria mineral, com seus diferentes setores, é agente desde a extração de minerais metálicos para indústria de equipamentos médicos, até a mineração de rochas ornamentais a fim de obtenção de placas rochosas para utilização como revestimento na construção civil, adornando ambientes. A indústria de rochas ornamentais, por sua vez, gera resíduos sólidos em todo o

seu processo produtivo, desde a extração até o beneficiamento, ocasionando diferentes impactos ambientais adversos ao meio ambiente.

Na região Seridó do Rio Grande do Norte a mineração de rochas ornamentais contribui positivamente com a economia local e Estadual. Por outro lado, por se encontrar na região do semiárido brasileiro, acaba contribuindo de maneira antrópica com a aceleração do processo de desertificação, desde a retirada da cobertura vegetal até o descarte ao meio ambiente, de maneira direta, do resíduo pó de rocha ornamental (RPRO) oriundo da etapa de beneficiamento. De acordo com Pontes *et al.* (2020), pouca ou nenhuma ação tem sido dada a extração de rochas graníticas, amplamente utilizadas na indústria da construção civil, com foco na economia circular.

Assim, sabendo-se que as indústrias mineral e de construção civil são de suma importância para o desenvolvimento socioeconômico, bem como o destacado papel da indústria de rocha ornamental para o Seridó Potiguar, torna-se necessário propor medidas mitigadoras de redução dos resíduos sólidos oriundos da indústria de rocha ornamental; gerando dados a respeito do tema que possam contribuir com soluções aplicáveis pela indústria de construção civil.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

No capítulo 2 do trabalho, encontra-se a fundamentação teórica desta pesquisa, a qual segue uma linha lógica para compreensão e reflexão a respeito da temática abordada pelo pesquisador.

2.1 DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E FATORES ESG

As questões ambientais têm sido responsáveis por grandes discussões globais a respeito do uso dos recursos naturais desde o século XX, quando se percebeu que o uso desenfreado desses recursos era inversamente proporcional as suas reservas. Segundo Philippi *et al.* (2014), crescentes reflexões sobre acidentes ambientais ocorridos e a necessidade de revisão de paradigmas então vigentes estimularam países e a comunidade internacional a desenvolver ações conjuntas.

Ao longo dos anos, após os diferentes eventos climáticos adversos, o conceito de desenvolvimento sustentável vem sendo aprimorado com objetivo de buscar um equilíbrio no ecossistema terrestre. O cientista Elkington (2011) foi o responsável pela criação do conceito “triple bottom line”, aonde a sustentabilidade deve envolver a dimensão social, o planeta e o lucro. Nessa perspectiva, a Organização das Nações Unidas (ONU) estabeleceu um conjunto de metas e objetivos através do relatório “Transformando Nosso Mundo: a Agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável” (United Nations, 2015); conforme mostra a Figura 1.

Figura 1 - Objetivos do Desenvolvimento Sustentável da Agenda 2030.



Fonte: United Nations (2015).

Observa-se que os 17 ODS's estão atrelados ao tripé econômico, social e ambiental; mas dessa vez o econômico apresenta diferenças ao apresentado por Elkington (2011). Deve existir uma responsabilidade empresarial frente aos efeitos adversos ao meio ambiente que estão existindo, como a perda a biodiversidade, emissão de gases tóxicos, exploração desenfreada dos recursos naturais com foco no desenvolvimento verde, passando a ser integrado a governança da empresa (Elkington, 2020).

2.2 A INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS, CONSTRUÇÃO CIVIL E A ECONOMIA

A indústria de rochas ornamentais atua positivamente na economia nacional, contribuindo substancialmente com o Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro. No Rio Grande do Norte a extração dessas rochas ocorre na região Seridó por possuir uma diversidade de rochas com cores e texturas variadas dada a característica geológica do local, contribuindo, conseqüentemente, com a economia Potiguar. Porém, essa atividade chega a ser pequena quando comparada com a do Estado do Espírito Santo, sudeste brasileiro. Segundo Dantas *et al.* (2020), a proximidade do Espírito Santo com grandes estruturas portuárias e o baixo valor cobrado no Imposto Sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS) contribuem com essa mineração local.

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), na Norma Brasileira 15012:2013, a rocha ornamental é definida como “material pétreo natural, utilizado em revestimentos internos e externos, estruturas, elementos de composição arquitetônica, decoração, mobiliário e arte funerária”; estando a sua aplicação na indústria da construção civil.

Uma breve análise nos números do setor demonstra sua capacidade de modelagem da economia brasileira. Conforme Nitahara (2021), os dados divulgados pelo IBGE, no ano de 2019, antes da pandemia causada pelo novo coronavírus, mostrou o setor da construção civil totalizando R\$ 288 bilhões em obras, serviços e incorporações. Ainda, apesar dos incalculáveis problemas causados pela pandemia, em 2021 o setor contou com um crescimento de 9,7% do faturamento (CBIC, 2022). Analisando os números apresentados é percebido como o setor possui uma importância na balança comercial brasileira e seus produtos são essenciais para toda dinâmica econômica do mercado.

2.3 ARGAMASSA

A indústria da construção civil está intrinsecamente ligada ao desenvolvimento socioeconômico. Dentre os principais produtos desse setor (construção e serviços) e que são indispensáveis, citam-se, por exemplo, o concreto, o aço e os produtos do setor ceramista (tijolos, telhas, lajotas, revestimentos, vidro, cimento, dentre outros). Contudo, para que empreendimentos da construção civil sejam executados, existem outros produtos que são necessários, tais como as argamassas que possuem funções intrinsecamente ligadas as edificações.

A definição geral de argamassa é encontrada na NBR 13529 onde tem-se o seguinte termo, a saber: “mistura homogênea de agregado (s) miúdo (s), aglomerante (s) inorgânico (s) e água, contendo ou não aditivos ou adições, com propriedades de aderência e endurecimento” (ABNT, 1995). De acordo com Martinelli (1989) *apud* Mendonça (2021), as argamassas devem possuir as seguintes características técnicas: aderir blocos, ter a capacidade de deformar-se em diversos ambientes, resistir às cargas sem ruptura, complementação de sistemas acústicos e térmicos, entre outras.

As argamassas são classificadas em relação a execução para qual serão utilizadas, entre as quais: assentamento, colante, revestimento e rejuntamento. Contudo, há tipos especiais de argamassas que possuem propriedades tecnológicas singulares quando são comparadas com as mais comumente encontradas no mercado; bem como existem estudos que apresentam potencialidades na incorporação e adição de resíduos nesse tipo de material, gerando uma argamassa sustentável e possuindo potencial para gerar inovação e, inclusive, criação de novos produtos.

A pesquisa realizada por Mendonça *et al.* (2021), por exemplo, incorporou o resíduo do mármore na fabricação de argamassas. As conclusões deste trabalho satisfizeram os parâmetros normativos. No trabalho desenvolvido por Silva *et al.* (2018) ocorreu a incorporação dos resíduos do polimento das placas de mármore e granitos em argamassas do tipo colantes. Em se tratando de argamassas autonivelantes, Araújo *et al.* (2015), incorporou fíler de calcário e o resíduo da biomassa de cana-de-açúcar, onde os autores apontam que os resultados foram satisfatórios. Os pesquisadores Barluenga e Hernández-Olivares (2010), realizaram a incorporação de ardósia moída de resíduos de pedreiras em argamassa autonivelante e obtiveram resultados positivos quanto as suas características no estado fresco e endurecido.

2.4 ARGAMASSA AUTONIVELANTE

De acordo com Araújo *et al.* (2015), argamassas autonivelantes são compósitos cimentícios com capacidade de fluxo através do seu próprio peso, sem apresentar segregação e exsudação. Araújo *et al.* (2015) complementa:

“As argamassas autonivelantes são uma variedade de argamassa que apresenta características particulares e específicas, como alta fluidez, baixa viscosidade, acentuada aderência, capacidade de nivelar-se pelo seu próprio peso e inexistência de exsudação.” (Araújo *et al.*, 2015, p. 03).

Tais características vão de encontro a definição de Chaves (2019) que afirma: “a argamassa autonivelante é um produto de elevada fluidez, capaz de se auto adensar, sem segregar, mantendo-se coesa e homogênea, podendo ser

definida como uma argamassa autoadensável”. De acordo com Pereira e Camarini (2018), tais características aumentam a produtividade no canteiro de obras, pois reduz significativamente o número de etapas quando comparada com a argamassa convencional usada para o mesmo fim.

Ainda segundo Pereira e Camarini (2018), o uso e a comercialização de argamassas autonivelantes tiveram início na Europa no ano de 1977, mas no Brasil o seu uso não é comum, tendo a comercialização restrita na venda em sacos ou utilização em plantas de obras, com uso local no canteiro por bombeamento.

Seus constituintes devem possuir características específicas para garantir as suas propriedades adequadas, como por exemplo a fluidez sem que ocorra segregação, proporcionando uma moldagem adequada, isenta de falhas decorrentes de sua aplicação, dada a sua característica de se autonivelar pelo próprio peso, sem depender de aplicação.

Mendes (2019) afirma que aditivos químicos e adições minerais são os responsáveis de modificar as características reológicas no estado fresco e as propriedades físico-mecânicas no estado endurecido, de modo a atender as características desse tipo de argamassa.

2.4.1 Elementos constituintes e características

A argamassa autonivelante possui como característica o seu nivelamento pela própria gravidade, sem qualquer energia de compactação, auxiliando de maneira positiva obras que possuem curtos prazos para entrega e pouca mão de obra. Este material que ainda é pouco utilizado no Brasil possui como constituintes aditivos químicos, cimento aluminoso e grandes volumes de pós, elevando o custo da argamassa (Yang; Zhang; Yan, 2016).

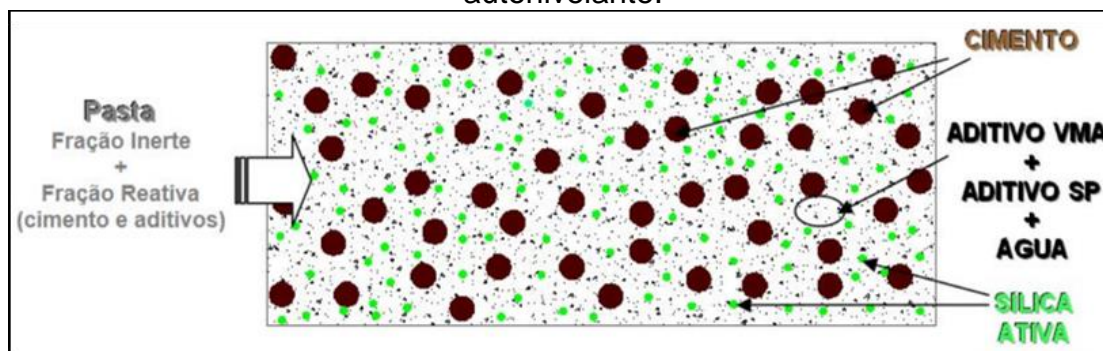
Assim, Yang, Zhang e Yan (2016), propõem o uso de resíduos minerais finos como uma alternativa sustentável para baratear a argamassa autonivelante, bem como reduzir o consumo de cimento e, por conseguinte, reduzir a emissão de CO₂ em seu processo de fabricação. Ainda, de acordo com Zhi, Huang e Guo (2017), esses resíduos finos, na mistura, se assemelham aos

aditivos químicos, atuando como um modificador de viscosidade, garantindo as características de fluidez e trabalhabilidade no estado fresco.

Desse modo, é possível observar que não há nenhum constituinte especial para compor as argamassas autonivelantes das demais. Trata-se de um material cimentício composto por aglomerante, agregado miúdo e aditivos químicos (superplastificante e modificador de viscosidade); e, podendo haver, ou não, adições minerais. Embora isso não necessite de nenhum material especial, os materiais utilizados devem possuir características específicas a fim de manter as suas características, evitando problemas ao produto (Aïtcin, 2000).

Segundo Costa (2006), a argamassa autonivelante no estado fresco se comporta como um conjunto de agregados imersos na matriz ou pasta, uma mistura do tipo sólido-líquido, garantindo a coesão e o espaço disponível para a movimentação dos agregados. A pesquisa realizada por Martins (2009), representou, através de uma figura, a pasta cimentícia da argamassa autonivelante, apresentada na Figura 2.

Figura 2 – Representação da microestrutura da pasta da argamassa autonivelante.



Fonte: Martins (2009).

Desse modo, a presente pesquisa faz utilização do aglomerante cimento CP V-ARI, água da rede pública de abastecimento de Natal/RN, areia fina, aditivo superplastificante da marca Sika e pó de rocha ornamental proveniente do processo de beneficiamento de rochas ornamentais como adição mineral. Utiliza-se, ainda, modificador de viscosidade (VMA) da marca Sika. Mas, cabe destacar, que existem argamassas autonivelantes de diferentes bases, como cimento, sulfato de cálcio, magnésio, entre outras (Chaves, 2019).

2.4.1.1 Cimento

O cimento trata-se de um material aglomerante pulverulento, fino e oriundo da moagem do clínquer, composto, basicamente, por silicatos hidráulicos de cálcio. De acordo com Pinheiro (2020), os clínqueres “são nódulos de 5 a 25 mm de diâmetro de um material sinterizado, produzido pelo cozimento, até a fusão incipiente de uma mistura de calcário e argila de tal forma que toda a cal se combine com os compostos argilosos, após homogeneizada”. A produção do cimento entra, então, como uma grande responsável pela emissão de CO₂ no planeta, contribuindo com a aceleração do efeito estufa.

As propriedades do cimento estão relacionadas diretamente com as proporções dos silicatos e aluminatos (Bauer, 2018), e os elementos necessários para sua fabricação são: calcário (clínquer), argila e matérias-primas corretivas (fíler, escória e/ou pozolana); resultando assim em um cimento portland.

O Quadro 1 apresenta os tipos de cimento e os seus componentes.

Quadro 1 – Limites de composição do cimento Portland (porcentagem de massa).

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

Fonte: NBR 16697 (ABNT, 2018).

Nesta pesquisa, utiliza-se o cimento Portland CP V – ARI de alta resistência inicial, e que não possui material pozolânico em sua composição, contribuindo com as análises comparativas entre os traços com adição mineral e sem adição mineral. Sendo assim, a dosagem do cimento é muito importante e precisa ser feita de forma precisa e sistemática uma vez que o excesso de cimento pode elevar a retração e ocasionar fissuras (Santos *et al.*, 2019).

2.4.1.2 Agregado miúdo

Na indústria de construção civil, os agregados são materiais granulosos e inertes os quais compõem as argamassas e concretos (Pinheiro e Crivelaro, 2020). Para as argamassas autonivelantes, a característica do agregado miúdo é particular e com granulometria fina, a fim de garantir a sua fluidez sem apresentar problemas. O agregado miúdo deve ser isento de agentes nocivos e impurezas (EN 12620, 2013).

A norma NBR 9935 (ABNT, 2011), apresenta a terminologia de agregados, sendo a areia o agregado miúdo originado através dos processos naturais ou artificiais da desintegração de rochas. Em argamassas, seja tradicional ou autonivelante, a granulometria do agregado miúdo se apresenta importante para composição do material. Sendo assim, a NBR NM 7211 (ABNT, 2009) estabelece os limites do agregado miúdo, conforme o Quadro 2.

Quadro 2 – Limites normatizados do agregado miúdo.

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISSO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada			
	Limites inferiores		Limites superiores	
	Zona utilizável	Zona ótima	Zona ótima	Zona utilizável
9,5 mm	0	0	0	0
6,3 mm	0	0	0	7
4,75 mm	0	0	5	10
2,36 mm	0	10	20	25
1,18 mm	5	20	30	50
600 µm	15	35	55	70
300 µm	50	65	85	95
150 µm	85	90	95	100

Notas:
 1. O módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90.
 2. O módulo de finura da zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20.
 3. O módulo de finura da zona utilizável superior varia de 2,90 a 3,50.

Fonte: Adaptado de ABNT NBR NM 7211 (2009).

As areias muito grossas podem provocar a ocorrência de segregação da argamassa autonivelante (Melo, 2005).

2.5 ADIÇÃO MINERAL EM ARGAMASSAS

A utilização de resíduos minerais na produção de materiais da indústria da construção civil entra como um forte aliado para o desenvolvimento sustentável, considerando que ambas as indústrias contribuem fortemente com o uso desenfreado dos recursos naturais. Na produção de argamassa, essa matéria-prima pode atuar em substituição ao cimento ou agregados, ou ainda com efeito de preenchimento – fíler.

Segundo Perlot *et al.* (2013), a adição mineral em substituição ao cimento Portland proporciona a redução de dióxido de carbono emitido à atmosfera comparado ao clínquer, reduzindo os impactos ambientais de intensificação do efeito estufa. Para Uysal e Yilmaz (2011), o uso de adições minerais em argamassas autonivelantes podem proporcionar melhor trabalhabilidade, empacotamento das partículas e diminuição da permeabilidade. Nessa perspectiva, Anjos *et al.* (2020), afirma que o estudo da dosagem para adições minerais que visem dar uma melhor trabalhabilidade em argamassas (no caso das autonivelantes) e redução dos percentuais de cimento se fazem necessários, uma vez que essas estratégias também podem promover um aumento da durabilidade, a depender do teor da adição mineral utilizada.

Dada a relevância para o meio ambiente, os programas de pós-graduação no Brasil têm desenvolvido trabalhos com essa temática. Para tanto, realizou-se uma pesquisa na Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações buscando os termos: adição mineral e argamassa com o uso de aspas como operador booleano. O Quadro 3 mostra o resultado dessa pesquisa para o período de 2018 a 2022.

Quadro 3 – Teses e dissertações dos programas de pós-graduação *stricto sensu* desenvolvidos no Brasil com a temática de adição mineral em argamassas no período entre 2018 e 2022.

Instituição	Ano	Autor	Trabalho	Conclusões
UEL	2018	Alisson Franco do Couto	Cinza de madeira de eucalipto como adição mineral em argamassas de cimento Portland	Incorporação da Cinza de Madeira de Eucalipto (CME) como adição mineral em argamassas de cimento Portland. Concluiu-se que a CME é uma adição mineral em potencial.
UFSCar	2018	Rosana Schmalz	Durabilidade de argamassas submetidas ao ataque de sulfatos: efeito da adição da nanosílica	Produção de material cimentícios com adição de nanosílica para reagir química e fisicamente nas reações de hidratação do cimento. A adição mineral contribuiu para o aumento da resistência à compressão e, principalmente, para a redução dos coeficientes de absorção capilar das argamassas, devido aos seus efeitos fíler e pozolânico.
UFPR	2018	Cleber dos Santos Adorno	Efeitos físico-químicos de adições minerais na reatividade álcali-agregado em compósitos de cimento portland	Utilizou-se diferentes adições: filer quartzoso, metacaulim, sílica ativa, cinza volante, sílica de casca de arroz e resíduos de material cerâmico, afim de investigar se o efeito fíler também pode ser um parâmetro mitigador da reação álcali-sílica. Apenas o resíduo cerâmico apresentou resultados que não mitigam a expansão por reação álcali-sílica, tendo, em contrapartida, todas as outras adições utilizadas colaborando para a redução da expansão por álcali-sílica, principalmente a sílica ativa. Ou seja, atuando como um material pozolânico.
UNB	2018	Gabriel Lima Oliveira Martins	Influência do teor de sílica amorfa na atividade pozolânica de adições minerais altamente reativas	Verificou-se o teor de sílica amorfa em atividade pozolânica através de diferentes adições minerais (cinza de casca de arroz - CCA, sílica ativa, metacaulim e CCA comercial). Observou-se que a maioria das técnicas utilizadas para avaliação do teor de sílica amorfa conseguiram descrever a grau de amorfismo das amostras sob aspectos quantitativos e qualitativos. Destaca-se o aumento da área superficial pela moagem das amostras de CCA's contribuiu para o aumento do teor de sílica amorfa e para atividade pozolânica.

Instituição	Ano	Autor	Trabalho	Conclusões
UFC	2018	Raphael Arlego de Alcântara Santana	Avaliação do uso dos subprodutos da dessulfurização semi-seca dos gases da combustão da termelétrica do Pecém como insumo para a construção civil	O trabalho estuda o resíduo oriundo dos gases de uma termelétrica, utilizando-o como adição mineral em concretos e argamassas. Foi identificado que esse resíduo é não perigoso e não inerte, e que não pode ser utilizado como uma pozolana (dentre os motivos, por apresentar elevado teor de enxofre). A pesquisa enfatizou a possibilidade de substituição da cal pelo resíduo, e mostrou que a resistência da argamassa ou se manteve igual ao convencional, ou foi superior, mostrando a possibilidade dessa adição mineral.
UFSC	2018	André Valmir Saugo Ribeiro	Influência de adições minerais na elevação da temperatura de concretos massa de elevada resistência à compressão	Nesta pesquisa utilizou-se dois aglomerantes (CP V-ARI e o CP III RS) e adições minerais (metacaulim e sílica ativa). Concluiu-se que, em uma mesma resistência, o aglomerante CP III - RS tem uma menor liberação de temperatura do que o concreto produzido com os demais aglomerantes.
UFPA	2018	Marcelly de Figueiredo Mendonça	Substituição parcial do cimento portland por cinzas de Bambu (Bambusa Vulgaris)	Foram produzidas cinzas do colmo do bambu em três temperaturas de calcinação: 500°C, 600°C e 700°C. A cinza produzida a 600°C obteve índice de desempenho com o cimento Portland aos 28 dias superior ao estabelecido pela NBR 12653 (ABNT, 2014). Foi expressiva a incorporação de 10% de cinzas. A resistência à compressão, no estado endurecido, sofreu acréscimo entre 10 e 15% com a adição das cinzas.
UFPA	2019	Patrícia da Silva Chaves.	Argamassa autonivelante com adição mineral (fíler) de resíduo de beneficiamento de mármore e granito.	Utiliza-lo como adição em argamassa autonivelante para promover coesão, similar ao aditivo modificador de viscosidade (VMA). Concluiu-se que o resíduo (adição mineral) pode ser utilizado como um material alternativo em substituição ao VMA.
Unoeste	2019	Lucas Henrique P. Silva	Cinza de forno de olaria e cinza da palha de bambu: caracterização para uso como adição mineral ativa com cimento Portland	Utilização de cinza de forno de olaria (CFO) e a cinza da palha do bambu (CPB) e verificar se estes materiais apresentam as características necessárias para uso como material pozolânico com cimento Portland. Os resultados para o CFO não foram positivos, mas para o CPB foram satisfatórios, principalmente no que consiste o ganho de resistência aos 91 dias, sendo possível a sua utilização como material pozolânico.

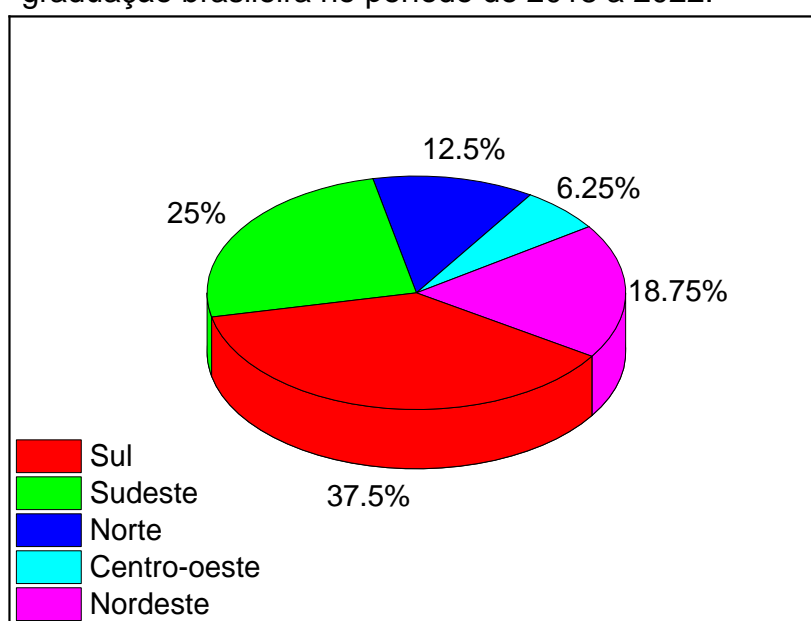
Instituição	Ano	Autor	Trabalho	Conclusões
UFV	2019	José Maria Franco de Carvalho	Obtention of eco-efficient cement-based composites using industrial waste	O trabalho utilizou rejeito da mineração como adição mineral para substituição parcial do cimento Portland e aumento da densidade de empacotamento da fração fina em matrizes cimentícias. Verificou-se o grande potencial dos produtos propostos na obtenção de matrizes cimentícias de elevada resistência mecânica.
UEM	2019	Rafael Germano Dal Molin Filho	Cinza do bagaço da cana-de-açúcar : avanços no desenvolvimento de produtos verdes para a construção civil	Utilização de cinza do bagaço de cana-de-açúcar do estado do Paraná para utilização como adição mineral em substituição a areia ou como substituição parcial ao cimento, em uma ação pozolânica. A caracterização desses resíduos indicou que independente da usina coletada, o resíduo possui características para utilização como adição mineral em argamassas, existindo padrões entre características das amostras das usinas.
UFPE	2019	Romildo Alves Berenguer	Estudo da durabilidade e influência da adição da cinza do bagaço de cana-de-açúcar nas propriedades do concreto	A cinza utilizada foi oriunda de dois locais, um forno a lenha de uma pizzaria e uma usina. Através das caracterizações foi possível observar a semelhança das cinzas aos materiais pozolânicos.
UFPE	2019	Sara Martins Torres	Aplicação da difração de raios-X na análise do potencial pozolânico da cinza do bagaço da cana-de-açúcar para adição ao cimento Portland	A literatura apresenta o potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar para atividade pozolânica. Para a adição mineral, ocorreu a moagem e calcinação do resíduo. O trabalho realizou a análise por meio da difração de raios-X, com a alteração dos picos e concluiu que a adição mineral desse resíduo se mostrou como uma pozolana alternativa, uma vez que é devidamente beneficiada.
UEL	2020	Maria Fernanda Porto	Procedimento de dosagem para concreto leve autoadensável (CLAA) a partir da relação matriz cimentícia/vazios do esqueleto granular	Realizou-se o procedimento de dosagem validado com o estudo de combinações binárias (cimento Portland e pó de basalto (PB)) e ternária (cimento Portland, PB e sílica ativa) de materiais cimentícios e argila expandida. Verificou-se, após o procedimento de dosagem, a produção de um concreto leve autoadensável com características satisfatórias no estado fresco, resistência à compressão de 30 MPa, massa específica de 1.536 kg/m ³ , consumo de cimento Portland igual a 449 kg/m ³ e fator de eficiência de 20 MPa.dm ³ /kg.

Instituição	Ano	Autor	Trabalho	Conclusões
UFMG	2021	Bruna Silva Almada	Influência da heterogeneidade de rejeitos de minério de ferro utilizados como adição mineral nas propriedades de microconcretos	Avaliou-se a heterogeneidade do rejeito de minério de ferro e a sua influência quanto as propriedades de microconcretos. Neste trabalho, os melhores resultados indicaram uma tendência de melhoria de resistência mecânica, aumento de rigidez e redução de porosidade.
Unipampa	2021	Lopes, Daniele Ferreira	Avaliação das propriedades de argamassas armadas com adição de resíduos da geração termelétrica	Avaliou adições de resíduos da geração termoelétrica, cinza volante (CV) e o subproduto da dessulfurização gasosa (SP), em substituição parcial ao cimento Portland.

Fonte: Autor (2023).

Os estudos apresentados se concentram em Instituições do Sul e Sudeste do Brasil, conforme mostra a Figura 3, indicando que há uma demanda e interesse para esse tipo de pesquisa. Nas outras regiões do País esse dado é pequeno, o que indica a necessidade de se desenvolver pesquisas com a temática de adição mineral nesses locais.

Figura 3 – Porcentagem, por região, de TCCs nos programas de Pós-graduação brasileira no período de 2018 a 2022.



Fonte: Autor (2023).

É importante destacar que os trabalhos os quais estão sendo desenvolvidos seguem a linha da sustentabilidade, com uma proposta de adição mineral através da utilização de resíduos provenientes de diferentes indústrias, tais como: mineração, termelétricas, usinas de cana-de-açúcar; gerando benefícios econômicos e reduzindo passivos ambientais (Uysal e Yilmaz, 2011).

A adição mineral como material alternativo surge como uma alternativa para substituição ao cimento ou agregados miúdos visando impactos positivos ao meio ambiente. Em substituição ao cimento, essa adição proporciona a redução de dióxido de carbono (CO₂) emitidos no processo de fabricação do cimento. Já em adição e/ou substituição de agregado miúdo, proporciona a conservação de recursos naturais, diminuição da deposição de resíduos em diversos ambientes, além de vantagens econômicas e industriais (Pereira *et al.*, 2022).

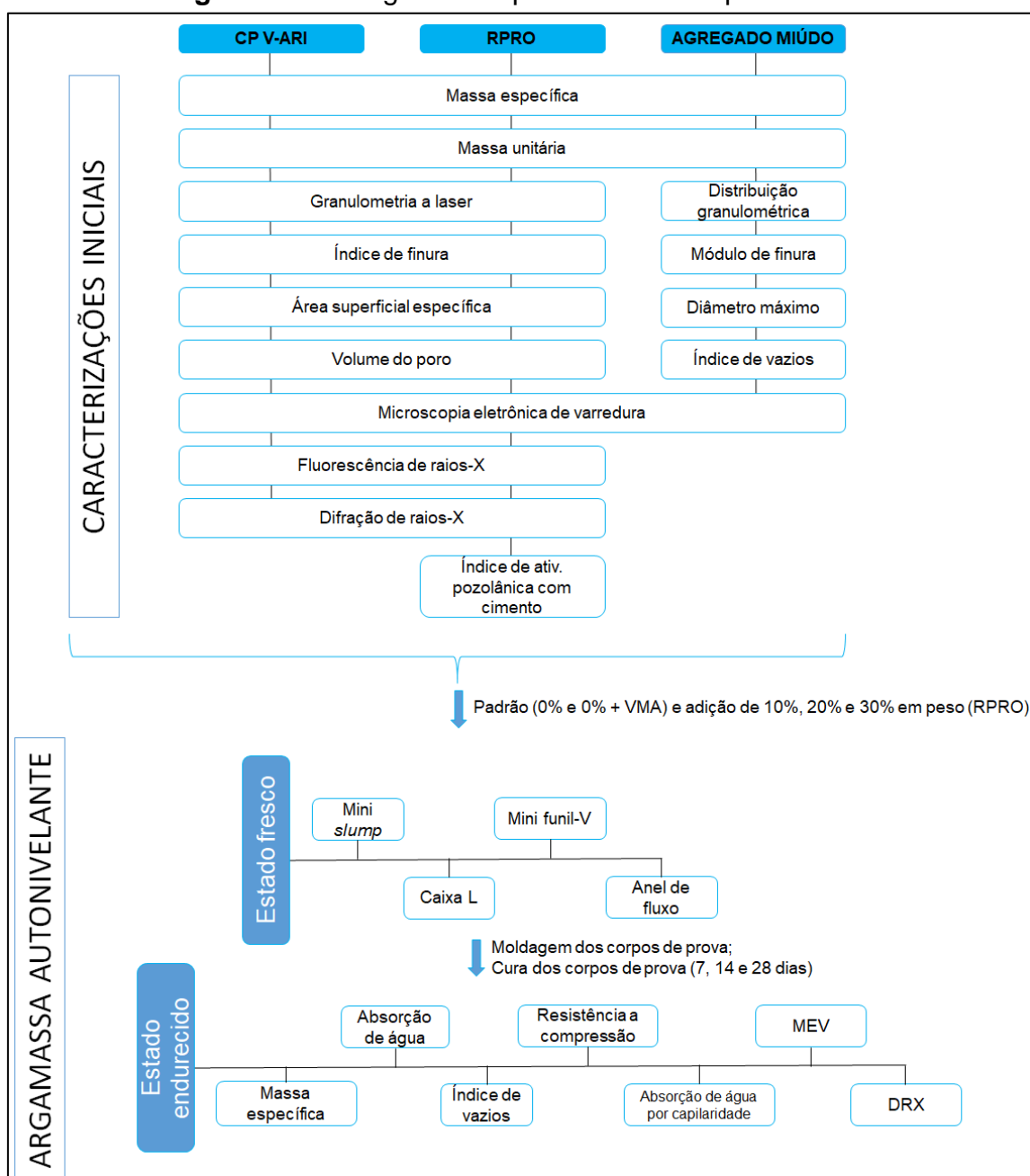
Segundo Barluenga e Hernández-Olivares (2010), a adição mineral com resíduo de ardósia proporcionou características de grande fluidez, baixa segregação e resistência a compressão moderada em argamassa autonivelante; além de um menor consumo de cimento devido a sua ação pozolânica. De acordo com Juenger e Siddique (2015), os materiais cimentícios suplementares, dentre eles os minerais, surgem como uma alternativa viável para substituição ao cimento em concretos e argamassas. Para isso, a melhor maneira de identificar novos materiais apropriados, maximizar seu uso e melhorar seu desempenho é através da caracterização apropriada do material e testes de pozolanidade.

Por outro lado, embora um material não possua atividade pozolânica, ele pode estar sendo utilizado em adição a argamassa com efeito de preenchimento, denominado fíler; contribuindo positivamente para o meio ambiente uma vez que há utilização de um passivo ambiental (resíduo) e, conseqüentemente, diminuição do consumo de cimento, como apresentado por Ye *et al.* (2007) e Poppe e Schutter (2005). Em argamassas autonivelantes o uso de adição de fíler calcário, basalto e quartzo, por exemplo, contribuiu na fluidez da argamassa (Scolaro e Rocha, 2021).

3 METODOLOGIA

O Capítulo 3 apresenta a metodologia adotada para a construção deste trabalho acadêmico científico. Na Figura 4, tem-se o procedimento experimental adotado para o desenvolvimento deste projeto de pesquisa.

Figura 4 – Fluxograma do procedimento experimental.



Fonte: Autor (2023).

Ainda, realizou-se a revisão da literatura preliminar e paralelamente ao procedimento experimental para embasamento científico. Assim, em conformidade com Gil (2002), tem-se um trabalho descritivo e experimental, com o estabelecimento de relações entre variáveis, a utilização de técnicas padronizadas e a manipulação de variáveis.

Destaca-se que o estudo ocorreu com três composições de argamassas autonivelantes: de referência (sem adição de RPRO; e com modificador de viscosidade) e proposta (com adição de RPRO em 10%, 20% e 30% em peso).

3.1 LABORATÓRIOS ENVOLVIDOS NO DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

O desenvolvimento do trabalho através do Programa de Pós-Graduação de Uso Sustentável de Recursos Naturais do IFRN *Campus* Natal-Central contou com o apoio de outras Instituições de Ensino Superior por meio de seus laboratórios para a realização dos ensaios os quais estão listados no Quadro 4.

Quadro 4 – Laboratórios utilizados para o desenvolvimento da pesquisa.

Instituição	Laboratório	Etapa	Ensaio
IFRN	Laboratório de Tecnologia Mineral e Materiais (LT2M)	Caracterizações iniciais	Massa específica
			Massa unitária
			Distribuição granulométrica
			Índice de vazios
			Módulo de finura
			Diâmetro máximo
			Índice de finura
			Perda ao fogo
	Fluorescência de raios-X (FRX)		
	Laboratório de Caracterização de Materiais e Resíduos (Lacamm)		Difração de raios-X (DRX)
			Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Instituição	Laboratório	Etapa	Ensaio
IFRN	Diacon	Caracterizações iniciais	Índice de atividade pozolânica com cimento
UFPB	Laboratório de Purificação e Aspersão de Materiais Argilosos (Lapema)		Granulometria a laser
UFS	Laboratório de Biomateriais (Biomat)		Área superficial específica
			Volume do poro
UFRN	Laboratório de Caracterização Estrutural de Materiais		Microscopia eletrônica de varredura (MEV)
IFRN	Laboratório de Tecnologia Mineral e Materiais (LT2M)	Estado fresco	Mini slump
			Mini funil-V
			Caixa L
			Retenção de fluxo
	Diretoria Acadêmica de Construção Civil	Estado endurecido	Moldagem e cura dos corpos de prova
			Absorção por capilaridade
			Massa específica
			Absorção de água
UFRN	Departamento de Física Teórica e Experimental	Estado endurecido	Índice de vazios
			Resistência à compressão
	Laboratório de Caracterização Estrutural de Materiais		DRX
			MEV

Fonte: Autor (2023).

Todos os ensaios apresentados estão em conformidade com o fluxograma apresentado na Figura 4.

3.2 MATERIAIS DE PARTIDA

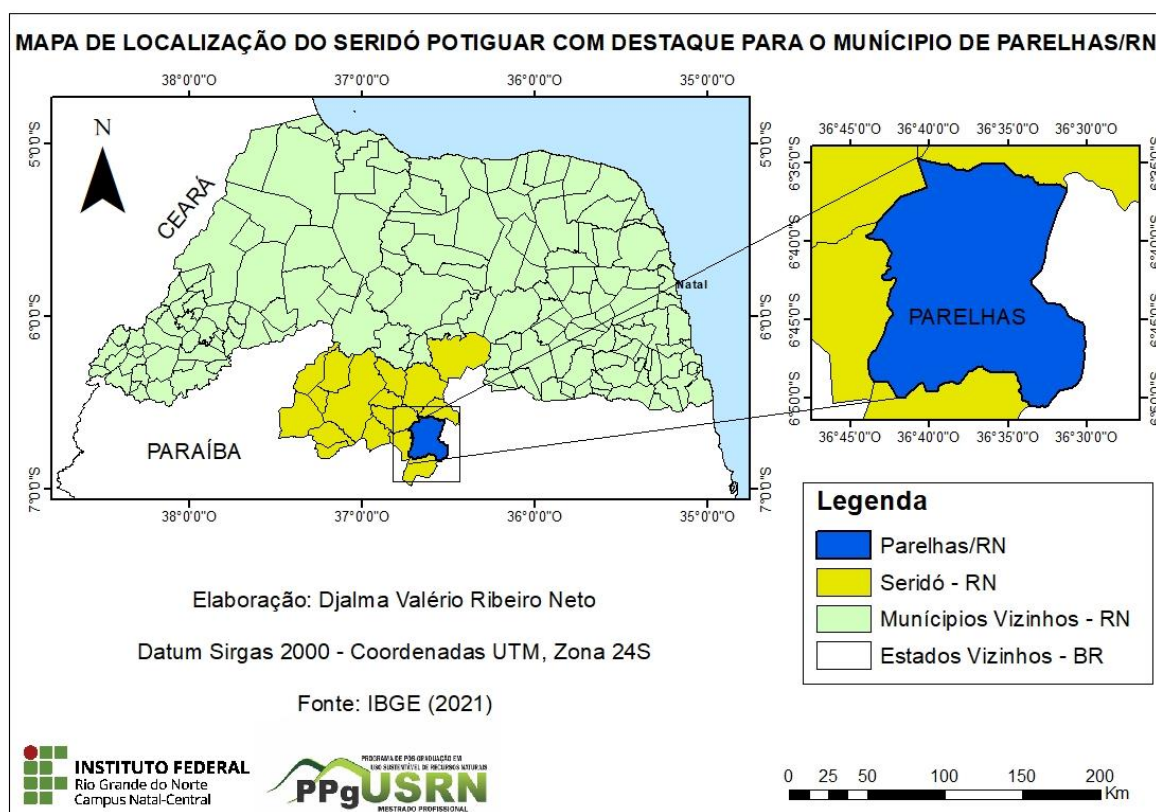
3.2.1 Resíduo pó de rocha ornamental

O resíduo utilizado neste projeto de pesquisa como proposta de adição mineral a uma argamassa autonivelante é o pó de rocha ornamental do município

de Parelhas-RN, localizado a 260Km da capital potiguar, Natal. A Figura 5 apresenta o mapa da localização de Parelhas-RN, o qual foi elaborado através do programa ArcGIS no computador do Laboratório de Tecnologia Mineral e Materiais (LT2M) do IFRN *Campus* Natal-Central.

A aquisição do resíduo se deu através de uma doação da empresa Thor Mármore e Granitos LTDA. com o intuito de realização de estudo com perspectiva de utilização do resíduo gerado no processo industrial. Tal perspectiva irá proporcionar uma contrapartida para a empresa no sentido de auxiliar na mitigação dos impactos ambientais.

Figura 5 – Mapa de localização do município de Parelhas-RN (local de coleta do RPRO).



Fonte: Autor (2022).

Os itens a seguir irão detalhar a coleta, preparação e caracterização do RPRO.

3.2.1.1 Coleta do resíduo e preparação da amostra

O processo produtivo de rochas ornamentais é responsável pela geração de resíduos sólidos, dentre eles o resíduo pó de rocha ornamental oriundo da etapa de beneficiamento. Assim, para este trabalho utilizou-se os resíduos da empresa Thor Granitos e Mármore LTDA. para adição em argamassas autonivelantes.

No galpão da empresa foi coletado o resíduo resultante do processo de corte das chapas de rochas ornamentais que ocorre através de teares multifios diamantados. As rochas que originaram essas chapas são de extração mineral de jazida na zona rural de Parelhas-RN.

Em uma pilha de resíduos, conforme mostra a Figura 6, as amostras foram coletadas em diferentes pontos *in loco* a fim de obtê-las de maneira representativa; a qual foi armazenada em sacos plásticos e identificadas como RPRO. Posteriormente, foram encaminhadas para o Laboratório de Tecnologia Mineral e Materiais (LT2M) do IFRN *Campus* Natal-Central.

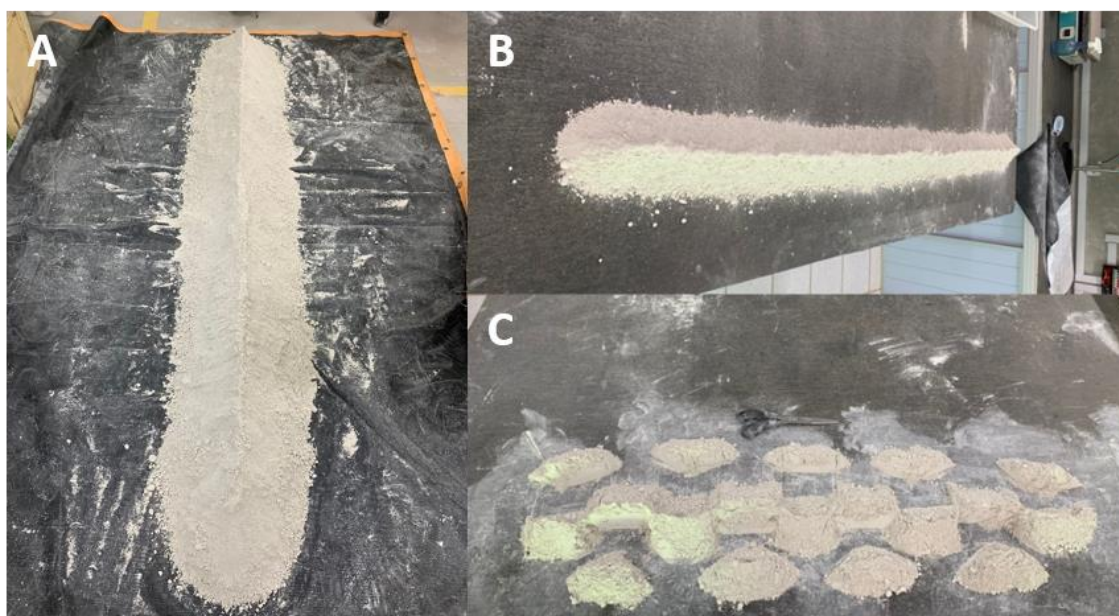
Figura 6 – RPRO no galpão da empresa Thor Mármore e Granitos LTDA.



Fonte: Arquivo pessoal (2022).

O RPRO não passou por nenhum processo de modificação, apenas por secagem, primeiramente a céu aberto e em seguida em estufa a uma temperatura de 100°C por 24h. Posteriormente, a amostra foi pesada, registrando-se uma massa total de 120Kg, para iniciar o processo de caracterização físico-química, estrutural, morfológica e de reatividade. Para garantir a representatividade amostral nesses ensaios, como afirma Oliveira e Aquino (2007), ocorreu a homogeneização da amostra em pilha longitudinal, conforme mostra a Figura 7, resultando em uma alíquota final de 1kg.

Figura 7 – Homogeneização em pilha longitudinal do RPRO.



Legenda: (A) Primeira pilha longitudinal da amostra; (B) Aproximadamente 12Kg da amostra na bancada; (C) Últimas alíquotas.
Fonte: Arquivo pessoal (2022).

Após a obtenção de alíquotas representativas de forma precisa, houveram as etapas de caracterização dessa matéria-prima, não ocorrendo peneiramento prévio das amostras.

3.2.1.2 Caracterização física do resíduo pó de rocha ornamental

A caracterização física do RPRO se deu através de diferentes ensaios normatizados. A massa específica ocorreu de acordo com a NBR 16605 (ABNT, 2017), no Laboratório de Tecnologia Mineral e Materiais (LT2M) do IFRN

Campus Natal-Central, com utilização do frasco de Le Chatelier certificado, conforme mostra a Figura 8.

Figura 8 – Ensaio de massa específica no frasco de Le Chatelier do RPRO.



Fonte: Arquivo pessoal (2022).

O ensaio de massa unitária ocorreu em conformidade com a NBR NM 45 (ABNT, 2006) e o índice de finura de acordo com a NBR NM 11579 (ABNT, 2013) com utilização de peneira com abertura de 75 μm .

A área superficial específica e o volume do poro foram obtidos através do método de BET no Laboratório de Biomateriais da Universidade Federal de Sergipe.

O Quadro 5 apresenta os ensaios e seus resultados.

Quadro 5 – Caracterização física do RPRO.

Caracterização Física	Normas – Especificações	Resultados
Massa específica (g/cm^3)	NBR 16605 (ABNT, 2017)	2,53
Massa unitária (g/cm^3)	NBR NM 45 (ABNT, 2006)	0,80
Índice de finura (%)	NBR 11579 (ABNT, 2013)	-

Caracterização Física	Normas – Especificações	Resultados
Área superficial específica	BET	1,872 m ² /g
Volume do poro	BET	4x10 ⁻³ cm ³ /g

Fonte: Autor (2023).

3.2.1.3 Caracterização química do resíduo pó de rocha ornamental

A caracterização química do resíduo – pó de rocha ornamental – ocorreu no Laboratório de Tecnologia Mineral e Materiais do IFRN *Campus* Natal-Central, através da técnica de fluorescência de raios-X (FRX) com a utilização do equipamento FRX portátil Thermo Scientific Niton XL3T, utilizando-se um total de 5g de amostra para a análise.

O resultado da fluorescência de raios-X do RPRO se encontra no Quadro 6.

Quadro 6 – Análise de fluorescência de raios-X do resíduo pó de rocha ornamental (RPRO).

ÓXIDOS	PERCENTUAIS
SiO₂	76,05
K₂O	8,43
P₂O₅	4,32
Al₂O₃	3,83
Fe₂O₃	3,16
CaO	3,09
TiO₂	0,48
SO₃	0,36
MnO	0,20
CuO	0,07
Mg	< LOD
MgO	< LOD
TOTAL	99,99

Fonte: Autor (2023).

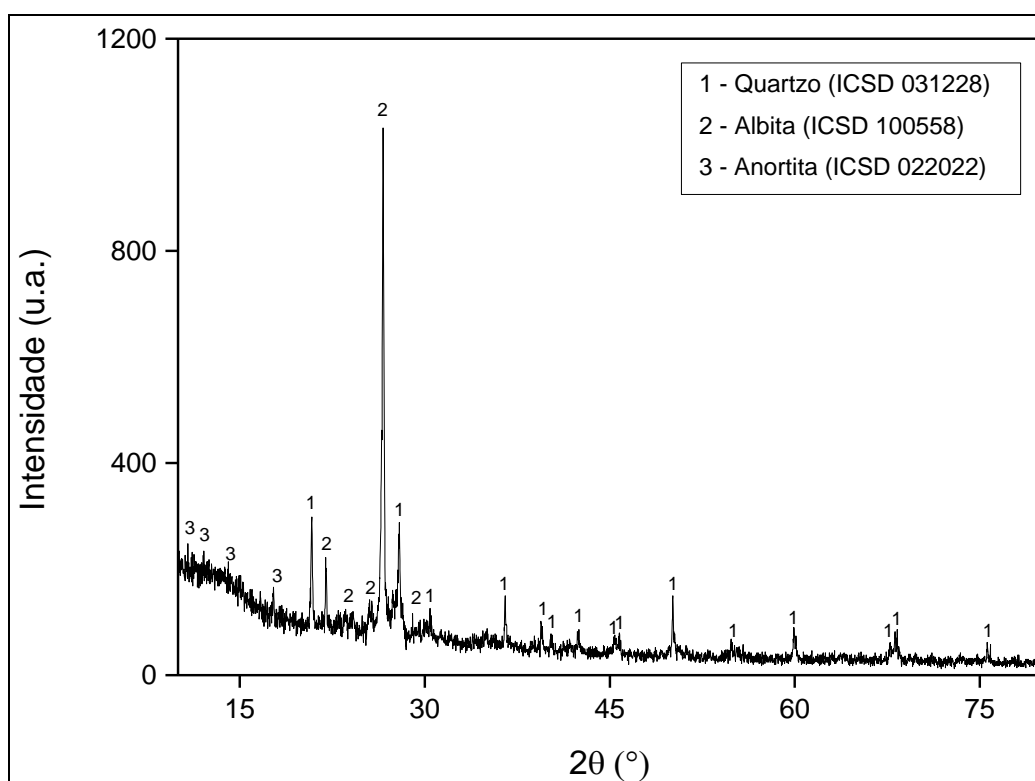
Considerando a NBR 12653 (ABNT, 2014), o resíduo é uma pozolana natural por possuir a soma dos óxidos de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ maior que 70%, sendo o RPRO constituído por 83,04% desses elementos.

3.2.1.4 Caracterização estrutural do resíduo pó de rocha ornamental

Após a análise de FRX, a amostra foi encaminhada para o Laboratório de Caracterização de Minerais e Materiais (Lacamm) da Diretoria Acadêmica de Recursos Naturais do IFRN *Campus* Natal-Central para análise microestrutural por difração de raios X da amostra.

A análise por difração de raios X foi feita através do equipamento Diffractometer X-RAY XDR-7000 por meio de um método não destrutivo, onde a leitura ocorreu com faixa angular de 10 a 80° e scan speed de 1°/min. A Figura 9 apresenta o resultado da análise realizada.

Figura 9 – Difratoograma do resíduo pó de rocha ornamental (RPRO).



Fonte: Autor (2023).

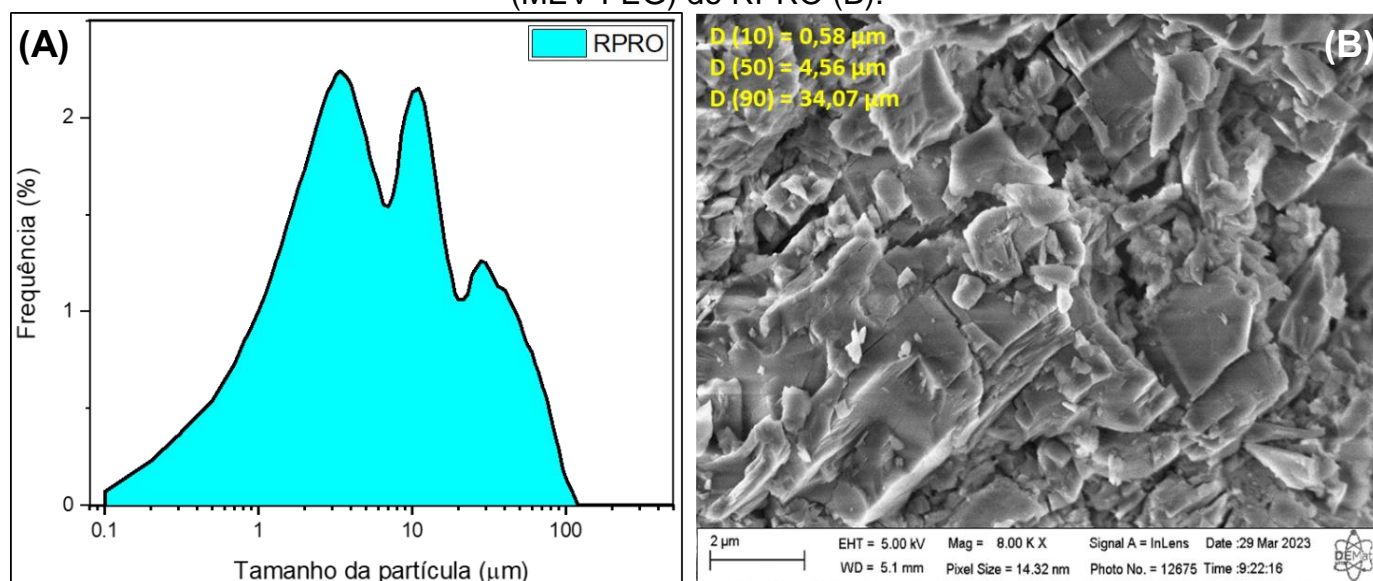
O difratograma do RPRO apresenta predominantemente a fase cristalina, com picos característicos de quartzo, albita e anortita, representando a estrutura mineralógica do material.

3.2.1.5 Caracterização granulométrica e morfológica do RPRO

O ensaio de distribuição granulométrica do resíduo pó de rocha ornamental ocorreu na Universidade Federal da Paraíba (UFPB), através do Laboratório de Purificação e Aspersão de Materiais Argilosos (Lapema), por meio da técnica de granulometria a laser com o equipamento Cilas 1090 Seco. O ensaio de análise morfológica (microscopia eletrônica de varredura – MEV-FEG) foi realizado na UFRN, no Laboratório de Caracterização Estrutural de Materiais.

A distribuição do tamanho de partículas e a microscopia eletrônica de varredura do RPRO se encontram na Figura 10.

Figura 10 – Distribuição do tamanho de partícula (A) e micrografia eletrônica (MEV-FEG) do RPRO (B).



Fonte: Autor (2023).

Analisando a Figura 10 (A), percebe-se uma larga distribuição do tamanho de partícula do resíduo, apresentando uma curva trimodal com distribuição de tamanhos $D(10) = 0,58 \mu\text{m}$; $D(50) = 4,56 \mu\text{m}$; $D(90) = 34,07 \mu\text{m}$, com uma partícula média de $11,63 \mu\text{m}$. Na Figura 10 (B), tem-se a análise morfológica com aumento de oito mil vezes da imagem, apresentando as partículas com tamanhos variados, distribuindo-se de maneira heterogênea, com morfologia irregular e angular.

3.2.1.6 Índice de atividade pozolânica do RPRO

A fim de compreender o efeito da adição mineral do resíduo na composição da argamassa autonivelante, realizou-se o ensaio normatizado de determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias através da NBR 5752 (ABNT, 2014). O ensaio foi realizado na Diretoria Acadêmica de Construção Civil do IFRN *Campus* Natal-Central, desde a mesa de consistência até o rompimento dos corpos de prova.

Cabe ressaltar que neste ensaio o índice de atividade pozolânica (IAP) ocorre em função do desempenho mecânico de duas argamassas, uma com cimento e outra com adição da pozolana natural, as quais são rompidas aos 28 dias.

3.2.2 Aglomerante – Cimento Portland CP V-ARI

O cimento utilizado na produção da argamassa autonivelante é o Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI) e sem adições pozolânicas em sua composição, em conformidade com a NBR 16697 (ABNT, 2018), o qual foi adquirido em loja de material de construção na região metropolitana de Natal-RN.

3.2.2.1 Caracterização física do cimento Portland CP V-ARI

A caracterização física se deu através dos ensaios de massa específica, de acordo com a NBR 16605 (ABNT, 2017), e massa unitária conforme a NBR NM 45 (ABNT, 2006); os quais foram realizados no Laboratório de Tecnologia Mineral e Materiais (LT2M) do IFRN *Campus* Natal-Central. Neste também foi realizado o ensaio de finura do cimento em acordo com a NBR 11579 (ABNT, 2013), que determina o índice de finura do material a partir de uma peneira com abertura de 75 μm .

As análises de área superficial específica e volume do poro foram realizadas pelo método de Brunauer, Emmett e Teller (BET) através do

equipamento quantachrome NOVA 1200e do laboratório de Biomateriais (Biomat) da Universidade Federal de Sergipe.

O Quadro 7 apresenta o resultado da caracterização física realizada no aglomerante utilizado como material de partida neste trabalho (CP V-ARI), tendo cada ensaio associado a uma norma específica.

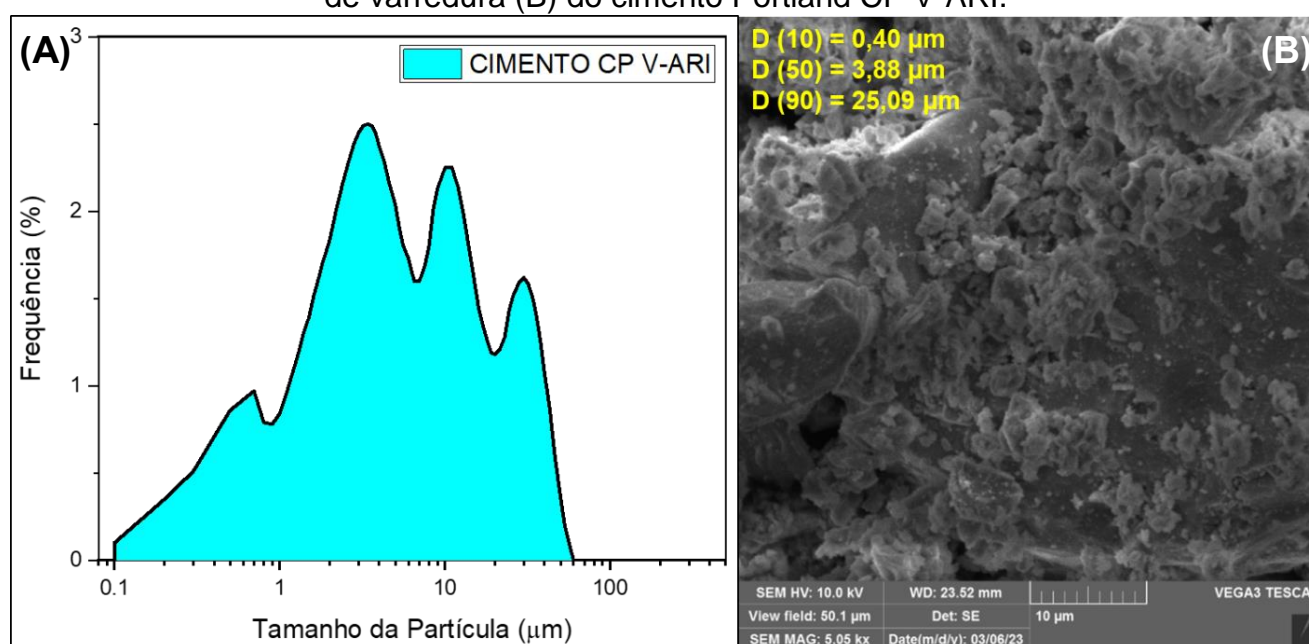
Quadro 7 – Caracterização física do Cimento Portland CP V-ARI.

Caracterização Física	Normas – Especificações	Resultados
Massa específica (g/cm ³)	NBR 16605 (ABNT, 2017)	3,0
Massa unitária (g/cm ³)	NBR NM 45 (ABNT, 2006)	0,88
Índice de finura (%)	NBR 11579 (ABNT, 2013)	1,2
Área superficial específica	BET	1.062 m ² /g
Volume do poro	BET	5x10 ⁻³ cm ³ /g

Fonte: Autor (2023).

A Figura 11 (A) e a Figura 11 (B) apresentam a distribuição do tamanho de partícula e a micrografia eletrônica de varredura do cimento Portland CP V-ARI.

Figura 11 – Distribuição do tamanho de partícula (A) e micrografia eletrônica de varredura (B) do cimento Portland CP V-ARI.



Fonte: Autor (2023).

A curva de distribuição do tamanho de partícula apresentada na Figura 11 (A) foi obtida através de ensaio de granulometria a laser no Laboratório de Purificação e Aspersão de Materiais Argilosos (Lapema) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB). E, o ensaio de análise morfológica (microscopia eletrônica de varredura) apresentado na Figura 11 (B) foi realizado no IFRN, no Laboratório de Caracterização de Minerais e Materiais (Lacamm) com o equipamento MEV Tescan VEGA 3.

Analisando a Figura 11 (A) é possível observar que a curva de distribuição de tamanho de partícula do cimento portland CP V-ARI é polimodal. O resultado do ensaio de distribuição granulométrica a laser apresentou os seguintes valores: $D(10) = 0,40 \mu\text{m}$; $D(50) = 3,88 \mu\text{m}$; $D(90) = 25,09 \mu\text{m}$, com uma partícula média de $8,40 \mu\text{m}$.

A micrografia eletrônica de varredura apresentada da Figura 11 (B) mostra um material fino e com formas irregulares e diferentes tamanhos de partículas, condizente com o gráfico de distribuição de tamanho de partícula.

3.2.2.2 Caracterização química do cimento Portland CP V-ARI

No Laboratório de Tecnologia Mineral e Materiais (LT2M) do IFRN Campus Natal-Central, realizou-se a caracterização química por meio da fluorescência de raios-X através do equipamento FRX portátil Thermo Scientific Niton XL3T. O Quadro 8 apresenta a composição química do CP V-ARI.

Quadro 8 – Composição química do cimento portland CP V-ARI.

ÓXIDOS	PERCENTUAIS
CaO	80,60
SO₃	7,48
SiO₂	5,44
Fe₂O₃	3,48
K₂O	1,78
P₂O₅	1,12
MnO	0,04
CuO	0,01
TOTAL	99,99

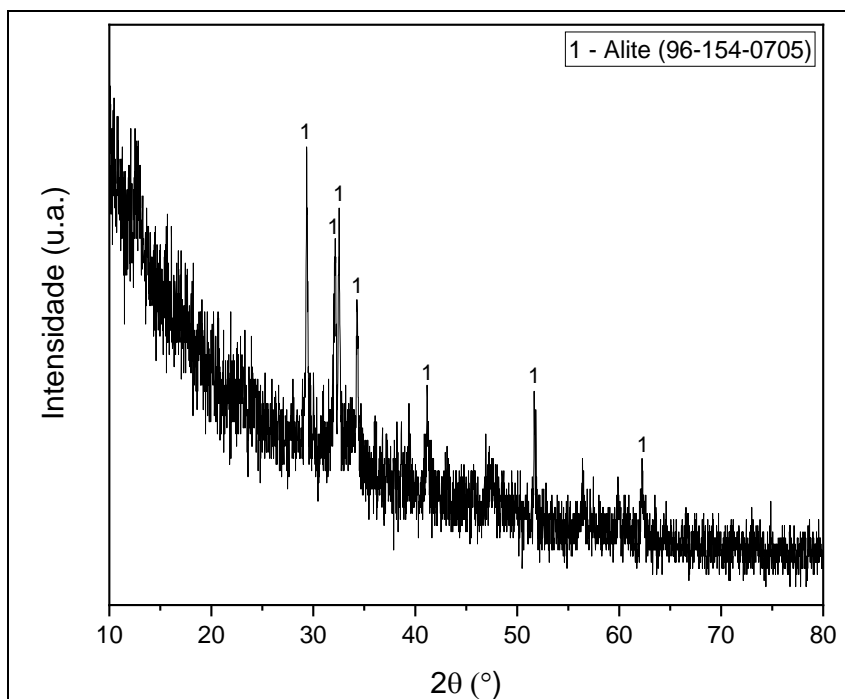
Fonte: Autor (2023).

A composição química do CP V-ARI é predominantemente de óxido de cálcio, representando 80% da amostra. Em menores percentuais há os óxidos de enxofre, sílica e ferro, além dos óxidos de potássio e fósforo que apresentaram percentuais abaixo de 2.

3.2.2.3 Caracterização estrutural do cimento Portland CP V-ARI

A análise de difração de raios X ocorreu através do equipamento Diffractometer X-RAY XDR-7000 por meio de um método não destrutivo; a leitura ocorreu com angulação de 5 a 80° e scan speed de 1°/min. A Figura 12 apresenta o resultado de DRX.

Figura 12 – DRX do cimento Portland CP V-ARI.



Fonte: Autor (2023).

A identificação das fases foi realizada através do software High Score Plus, utilizando-se a carta 96-154-0705 de seu banco de dados. O difratograma do cimento CP V-ARI apresenta, predominantemente, fase cristalina, com picos característicos de alite, representando a estrutura mineralógica do material.

3.2.3 Agregado miúdo – Areia fina

O agregado miúdo utilizado é uma areia quartzosa adquirida em uma loja de material de construção na região metropolitana de Natal-RN, a qual foi submetida a ensaios de caracterização física de determinação da massa específica, massa unitária, distribuição granulométrica com determinação do módulo de finura e diâmetro máximo; além de microscopia eletrônica de varredura (MEV) para análise morfológica.

3.2.3.1 Caracterização física da areia fina

Realizou-se a determinação de massa específica (g/cm^3) do agregado miúdo (areia fina) em conformidade com a NBR NM 52 (ABNT, 2009). No LT2M do IFRN *Campus* Natal-Central, o ensaio foi efetuado utilizando o frasco de Chapman, conforme mostra a Figura 13, com o objetivo de eliminar os poros permeáveis e obter a relação da massa do agregado seco e seu volume.

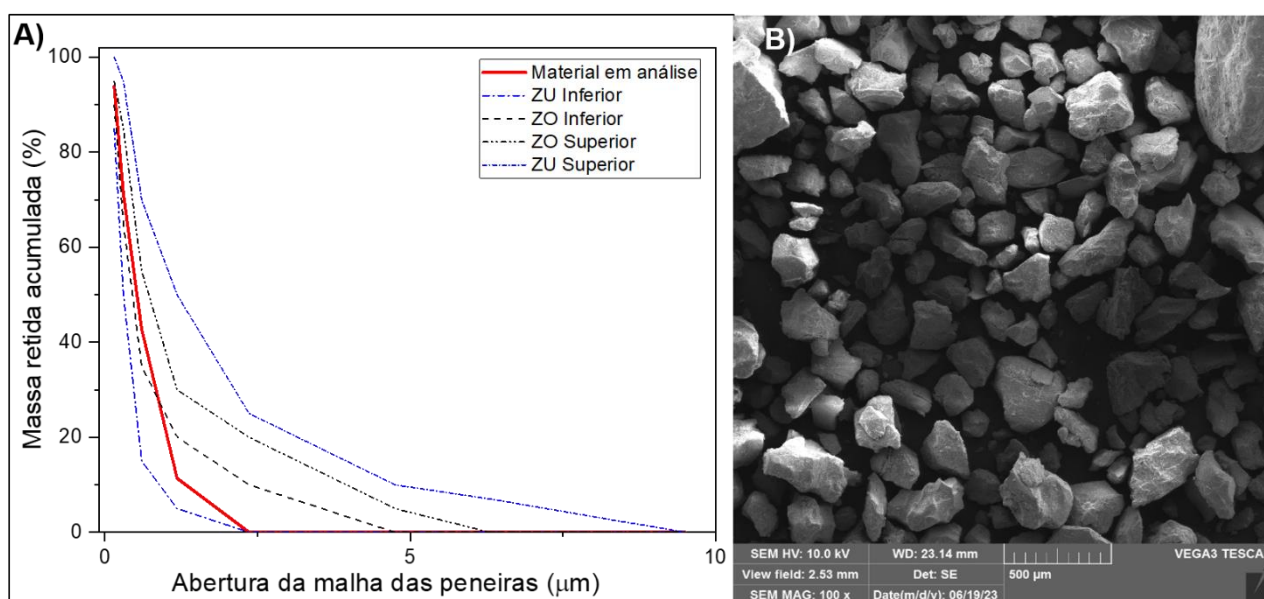
Figura 13 – Ensaio de massa específica do agregado miúdo.



Fonte: Arquivo pessoal (2023).

A microscopia eletrônica de varredura foi realizada com um aumento de 100x; a distribuição granulométrica ocorreu em consonância com a NBR NM 248 (ABNT, 2003). Na Figura 14 (A), tem-se a distribuição granulométrica e a microscopia eletrônica de varredura dos grãos.

Figura 14 – Gráfico de distribuição granulométrica e zonas estabelecidas na NBR NM 7211(ABNT, 2009) (A) e microscopia eletrônica de varredura (MEV) do agregado miúdo (B).



Fonte: Autor (2023).

Analisando a Figura 14 (A) e, de acordo com a NBR NM 7211 (ABNT, 2009), o agregado miúdo apresenta módulo de finura dentro da zona utilizável inferior, sendo caracterizada como areia fina. Na Figura 14 (B), tem-se a análise morfológica do agregado miúdo. É possível observar que as partículas possuem tamanhos variados, mas com predominância de um único tamanho, com arestas arredondadas, sendo adequada para argamassa autonivelante por contribuir com o seu espalhamento.

O Quadro 9 contém o resultado da caracterização do agregado miúdo utilizado nesta pesquisa.

Quadro 9 – Caracterização física do agregado miúdo – areia fina.

Caracterização Física	Normas – Especificações	Resultados
Massa específica (g/cm ³)	ABNT NBR NM 52 (2009)	2,60
Massa unitária (g/cm ³)	ABNT NBR NM 45 (2006)	1,50
Módulo de finura	ABNT NBR NM 7211 (2009)	2,19
Diâmetro máximo (mm)		2,4

Fonte: Autor (2023).

A areia fina com grãos arredondados e semiarredondados surge como um componente propício para utilização em argamassa autonivelante, a fim de proporcionar fluidez e maior trabalhabilidade.

3.2.4 Água

Na composição do traço adotado e produção dos corpos de prova, utilizou-se água proveniente do sistema de abastecimento de água da Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte (Caern) com uma temperatura ambiente.

3.2.5 Aditivos químicos

A fim de se obter as características necessárias para os ensaios reológicos da argamassa autonivelante, ocorreu a adição de aditivos químicos a fim de garantir a fluidez adequada e mantendo a estabilidade da mistura.

3.2.5.1 Aditivo superplastificante (SP)

O aditivo superplastificante utilizado foi da marca Silka a base de policarboxilato comercialmente conhecido como Sika Viscocrete 6090HW em um lote para laboratório. Seu estado físico é líquido com coloração bege clara.

3.2.5.2 Aditivo modificador de viscosidade (VMA)

Para o traço padrão com adição de modificador de viscosidade (VMA), utilizou-se o VMA da marca Silka com base química de solução de polímeros

modificadores de viscosidade. Trata-se de um material com aspecto pegajoso e cor amarelada, o qual possui uma densidade de $1,00 \pm 0,05$ Kg/L e pH $9,0 \pm 1,0$, de acordo com as especificações do fabricante (em anexo).

3.3 DEFINIÇÃO DOS TRAÇOS

No trabalho, foram confeccionados cinco traços de argamassas autonivelantes, sendo: padrão – com nenhuma adição mineral (0%), e com modificador de viscosidade (VMA), e três traços com adição mineral do resíduo pó de rocha ornamental – com 10%, 20% e 30% em peso de adição. A escolha dos traços foi baseada nos trabalhos de Araújo (2015), Chaves (2019), Barluenga e Hernández-Olivares (2010), Sato *et al.* (2018) e Libre *et al.* (2010), que realizaram adições em argamassas autonivelantes.

O Quadro 10 apresenta os traços adotados para este trabalho.

Quadro 10 – Traços adotados no trabalho.

	Traço		A/C	Adição do Resíduo Pó de Rocha Ornamental (RPRO)	Adição Química	
	Cimento	Areia			SP	VMA
Padrão (0%)	1	1,8	0,48	-	1,6%	-
Padrão (0% + VMA)	1	1,8	0,48	-	1,6%	0,06%
10% de RPRO	1	1,8	0,48	10%	2,0%	-
20% de RPRO	1	1,8	0,48	20%	2,0%	-
30% de RPRO	1	1,8	0,48	30%	3,0%	-

Fonte: Autor (2023).

A relação água/cimento foi fixada em 0,48 para não prejudicar nas análises a serem realizadas nas argamassas autonivelantes desenvolvidas. Porém, ocorreu a variação de superplastificante com objetivo de garantir as características de autonivelamento para os diferentes percentuais de adição mineral. Para tanto, a quantidade de aditivo ocorreu de acordo com o espalhamento da argamassa por meio do ensaio de mini slump, de modo que

atendesse aos limites de consistência e tempo de fluidez estabelecidos pela Efnarc (2002).

3.4 ENSAIOS NO ESTADO FRESCO

Os ensaios no estado fresco para argamassas autonivelantes são extremamente necessários, uma vez que as principais diferenças entre esse tipo de argamassa e a argamassa tradicional se dá no estado fresco. Para tanto, a realização desses ensaios ocorreu no Laboratório de Tecnologia Mineral e Materiais do IFRN *Campus* Natal-Central com a produção de cinco formulações que resultaram em argamassas autonivelantes sem adição mineral, com modificador de viscosidade e com adição mineral em peso.

Para tanto, o procedimento de mistura para formação da pasta ocorreu através de agitação mecânica com um misturador de argamassa, adotando-se a seguinte sequência:

1. Mistura do cimento e areia, homogeneizando-os;
2. Adição de 70% da água, misturando-os até adquirir consistência;
3. Adição de todo o resíduo, misturando-o com toda a pasta já formada, e, posterior, adição dos 30% restantes de água;
4. Adição de 50% do superplastificante, misturando com toda a pasta, e posteriormente adição dos 50% restantes por aproximadamente 6 minutos.

Posteriormente, foram realizados os ensaios de mini slump, mini funil-V, caixa L adaptada e retenção de fluxo conforme a Efnarc (2002).

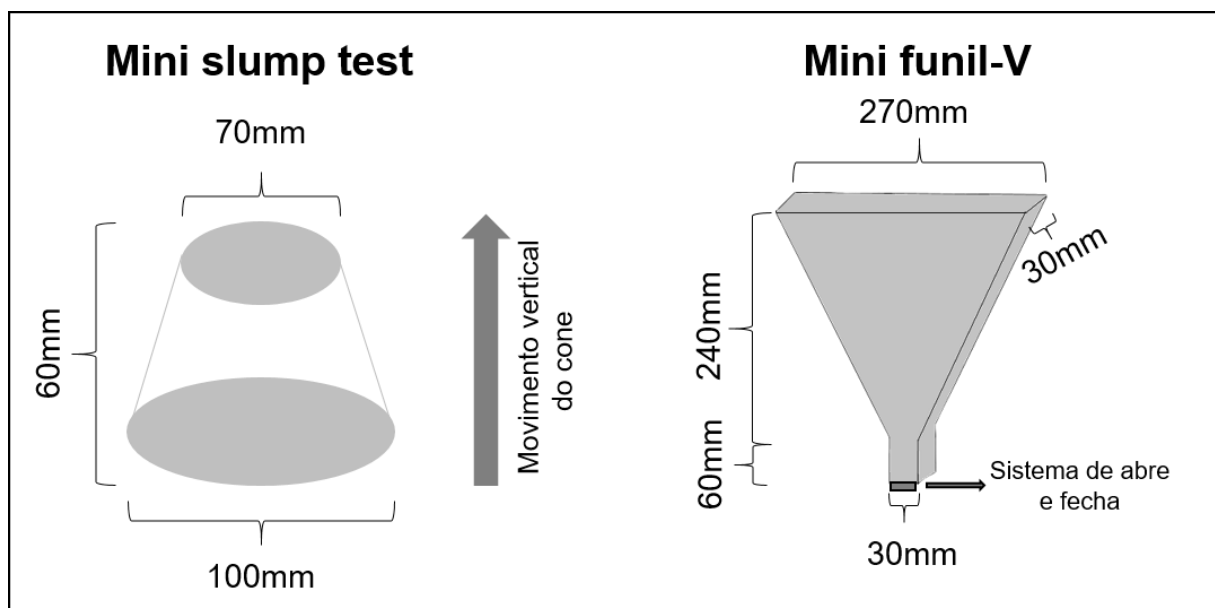
3.4.1 Consistência e tempo de fluxo e índice de estabilidade visual

Os ensaios de consistência, tempo de escoamento, e tempo de fluxo ocorreram embasados pela Efnarc (2002), utilizando os equipamentos mini slump test e mini funil-V. Tais ensaios são essenciais para verificar se a argamassa possui características de autonivelamento.

A análise de mini slump test ocorre através de um cone com medidas pré-estabelecidas a fim de verificar o espalhamento do material em milímetros (mm), o tempo de escoamento em segundos até atingir 250mm, além de uma análise visual de segregação do material e exsudação. E, a análise do mini funil-V ocorre em um funil com medidas pré-estabelecidas para de verificar a capacidade de preenchimento e a viscosidade do material.

A Figura 15 apresenta o mini slump test e o mini funil-V.

Figura 15 – Representação do mini slump test e mini funil-V.



Fonte: Autor (2023).

Ainda de acordo com a norma, no ensaio de mini slump test, a argamassa deve atingir um diâmetro mínimo de 25mm. E, o tempo de fluxo em segundos, no ensaio de mini funil-V, deve estar entre 7 e 11 minutos. Todos os utensílios utilizados possuem superfície lise e de material acrílico.

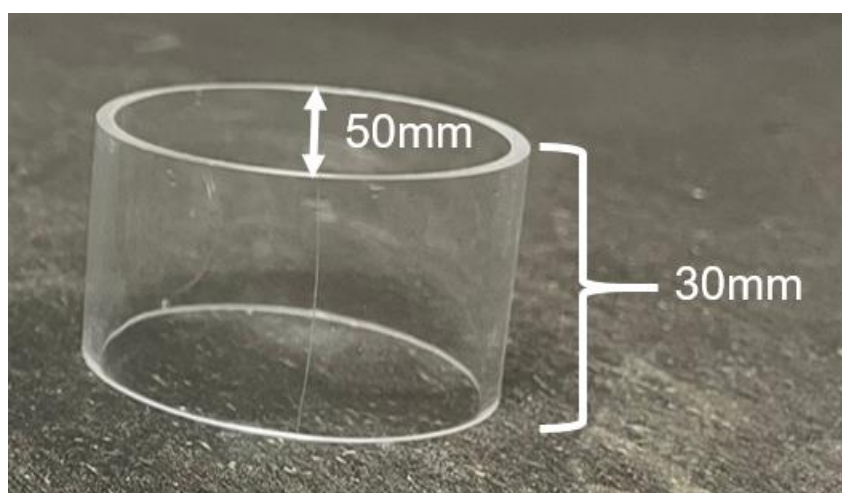
Realizou-se a análise do índice de estabilidade visual (IEV) conforme a NBR 15823-1 (ABNT, 2017). Entretanto, é importante ressaltar que por não existir norma para as argamassas autonivelantes, a norma utilizada para o IEV é recomendada para concretos autoadensáveis.

3.4.2 Retenção de fluxo

O ensaio de retenção de fluxo para determinação de argamassa autonivelante ocorreu com um anel de fluxo de diâmetro interno de 50mm e altura de 30mm fabricado em material acrílico. Para tanto, foi medido o espalhamento da pasta com 20 e 30 minutos após a adição da água na mistura seca da argamassa, a fim de se obter informações da retenção de fluxo de acordo com o diâmetro de espalhamento.

A Figura 16 apresenta o anel de fluxo utilizado nesta pesquisa.

Figura 16 – Anel de fluxo utilizado com dimensões da ASTM C1708 (2012).



Fonte: Arquivo pessoal (2023).

Tal ensaio se torna importante pois é necessário compreender o tempo de trabalhabilidade da argamassa autonivelante, de modo a garantir as suas características.

3.4.3 Ensaio de Caixa L

O método de ensaio caixa L é indicado para concreto autodescável por medir a habilidade de passante do material em uma câmara com eixo vertical e outro horizontal, e três hastes para verificar o tempo e o preenchimento do concreto na caixa, de acordo com a normatização NBR 15823-4 (ABNT, 2017). Para esta pesquisa, realizou-se o ensaio de caixa L adaptado, com o objetivo de analisar a habilidade de preenchimento da argamassa autonivelante. Para tanto,

a caixa possuía medidas proporcionais e avaliou-se o tempo de preenchimento de um volume de 1000 MI (Farias, 2019).

3.5 ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO

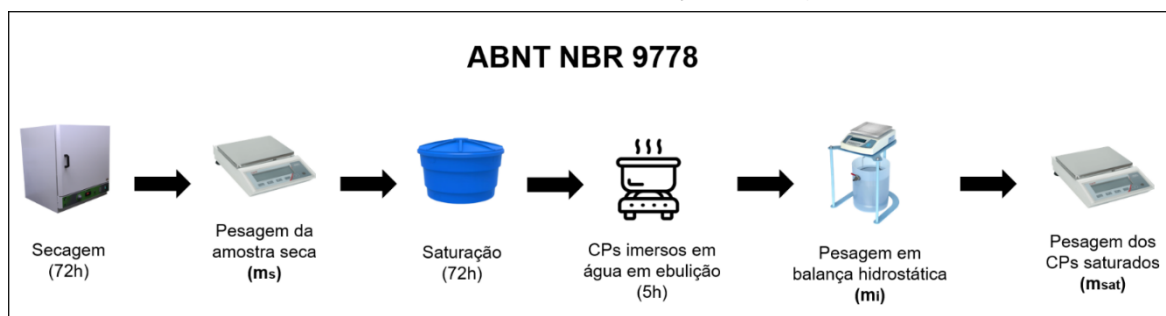
3.5.1 Massa específica, índice de vazios e absorção de água

O ensaio para determinação da massa específica, índice de vazios e absorção de água da argamassa autonivelante ocorreu no estado endurecido, em conformidade com a norma ABNT NBR 9778 (2005). Para tanto, o procedimento ocorreu no Laboratório de Tecnologia Mineral e Materiais (LT2M) do IFRN e contou com o apoio da Diretoria de Construção Civil do IFRN.

Realizou-se o ensaio de quinze corpos de prova prismáticos com dimensões 4x4x16cm, sendo 3 CPs para cada traço. Inicialmente, ocorreu a secagem dos corpos de prova em uma estufa por um período de 72h e temperatura de $\pm 105^{\circ}\text{C}$. Após secagem, pesou-se as amostras para obtenção do m_s . Em seguida, os corpos de prova ficaram em imersão em água, com temperatura ambiente, por 72h. Finalizado esse tempo, em um outro recipiente, colocou-se água a qual foi levada a ebulição progressivamente e, em seguida, colocou-se os CPs nesse recipiente, o qual ficou na água em ebulição por 5h.

Após a água retornar à temperatura ambiente, as amostras foram pesadas em balança hidrostática para obtenção do m_i e, em seguida, retirou-se o excesso de água dos CPs e os pesou-se em balança convencional para obter-se o m_{sat} . A Figura 17 apresenta, de forma ilustrativa, o procedimento experimental adotado para obtenção da massa específica, índice de vazios e absorção de água.

Figura 17 – Procedimento experimental para obtenção da massa específica, índice de vazios e absorção de água.



Fonte: Autor (2023).

Finalizada a etapa experimental, aplicou-se os dados obtidos nas fórmulas apresentadas pela ABNT NBR 9778 (2005), a saber:

<p>- Massa específica da amostra seca:</p> $\rho_s = \frac{m_s}{m_{sat} - m_i}$	<p>- Índice de vazios:</p> $I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \times 100$	<p>- Absorção:</p> $A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100$
---	---	---

Sendo:

- m_s : massa da amostra seca em estufa;
- m_i : massa, após fervura, da amostra saturada imersa em água;
- m_{sat} : massa da amostra saturada em água após imersão e fervura.

Aplicados os valores nas fórmulas estabelecidas na Norma, obteve-se informações da massa específica, índice de vazios e absorção dos traços referência e traços propostos da argamassa autonivelante com adição mineral.

3.5.2 Absorção por capilaridade e coeficiente por capilaridade

No Laboratório de Tecnologia Mineral e Materiais (LT2M) do IFRN *Campus* Natal-Central, realizou-se o ensaio de absorção por capilaridade em três corpos de prova prismáticos com dimensões de 4x4x16 cm e idade de 28 dias, em conformidade com a NBR 15259 (ABNT, 2005). Ocorreu a pesagem

dos corpos de prova secos e, realizou-se a pesagem aos 10 e 90 minutos dos CPs em contato com a água.

Foi calculada a média aritmética e o desvio padrão dos resultados obtidos.

3.5.3 Determinação da resistência à compressão

A determinação da resistência à compressão ocorreu na Diretoria Acadêmica de Construção Civil do IFRN *Campus* Natal-Central e em conformidade com a NBR 7215 (ABNT, 1996). Para tanto, o ensaio destrutivo ocorreu em três corpos de prova cilíndricos de 5x10 cm para cada idade dos traços, sendo 7, 14 e 28 dias, utilizando-se ao todo 45 CPs para rompimento axial.

A prensa utilizada foi da marca Contenco e os resultados foram emitidos pelo software Pavitest para cada corpo de prova rompido. Em seguida, obteve-se a média aritmética e o desvio padrão para cada idade do traço, padrão 0% e VMA; e traços propostos com adição mineral, em MPa, como resultado.

3.5.4 Difração de Raios-X (DRX) da argamassa autonivelante

A análise de difração de raios-X ocorreu no Departamento de Física Teórica e Experimental da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). O DRX foi realizado através do equipamento Diffractometer X-RAY XDR-7000 por meio de um método não destrutivo; a leitura ocorreu com uma faixa angular de 10 a 80° e scan speed de 2°/min. Ao todo, foram realizadas as análises dos cinco traços estudados neste trabalho com idade de 28 dias após a moldagem e cura dos corpos de prova.

3.5.5 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da argamassa autonivelante

A análise morfológica ocorreu Laboratório de Caracterização Estrutural de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Norte através da técnica de MEV-FEG. Ao todo, foram realizados os ensaios de cinco amostras, sendo uma amostra de cada traço aos 28 dias.

3.6 PRODUTO TÉCNICO

A produção técnica fruto desta pesquisa de Mestrado Profissional em Ciências Ambientais é um relatório técnico conclusivo, o qual apresenta a caracterização físico-química, morfológica e de reatividade do resíduo pó de rocha ornamental; encontra-se em apêndice a este trabalho.

O relatório foi entregue à empresa Thor Mármore e Granitos LTDA. do município de Parelhas-RN, em consonância com o objetivo do Programa de Pós-Graduação em Uso Sustentável de Recursos Naturais (PPgUSRN), para retorno imediato a sociedade.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos no decorrer da pesquisa, partindo da análise do índice de atividade pozolânica da adição mineral (resíduo pó de rocha ornamental), a partir de suas caracterizações iniciais, e a discussão do efeito da adição de RPRO nas propriedades reológicas e físico-mecânicas, estruturais e microestruturais da argamassa autonivelante no estado endurecido.

4.1 AVALIAÇÃO DE ATIVIDADE POZOLÂNICA DE RPRO ATRAVÉS DE SUAS CARACTERÍSTICAS INICIAIS (QUÍMICAS, ESTRUTURAIS E MECÂNICAS)

Analisando o Quadro 6, o qual apresenta o percentual em óxido dos elementos que compõem os materiais pozolânicos (classe E) e o RPRO, foi observado que o resíduo pó de rocha ornamental pode ser classificado como um material pozolânico de classe E por possuir a soma dos elementos $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ igual a 83,04%, de acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2014).

Quadro 11 – Percentual de elementos químicos para materiais pozolânicos (NBR 12653 (ABNT, 2014)) e RPRO.

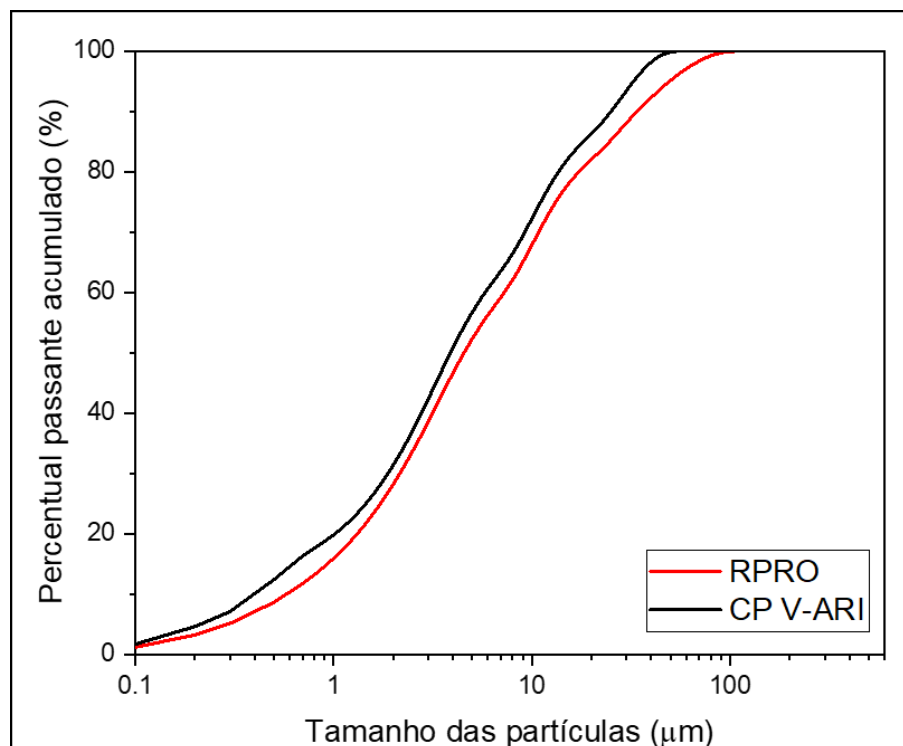
PROPRIEDADES	Classe de material pozolânico	RPRO
	E	E
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\geq 50\%$	83,04
SO_3	$\leq 5\%$	0,36

Fonte: Adaptado NBR 12653 (ABNT, 2014).

Entretanto, os resíduos de rochas ornamentais, eu geral, se comportam como fíler, apresentando efeito de preenchimento de vazios, e contribuindo com o empacotamento das partículas, e, dessa forma, auxiliando na viscosidade da

argamassa, fluidez e contribuindo com o empacotamento das partículas (Chaves, 2019). Buscando, também, compreender essa adição mineral, a Figura 18 apresenta a distribuição granulométrica do RPRO e do cimento Portland CP V-ARI utilizado neste trabalho.

Figura 18 – Distribuição granulométrica do RPRO e cimento Portland CP V-ARI.

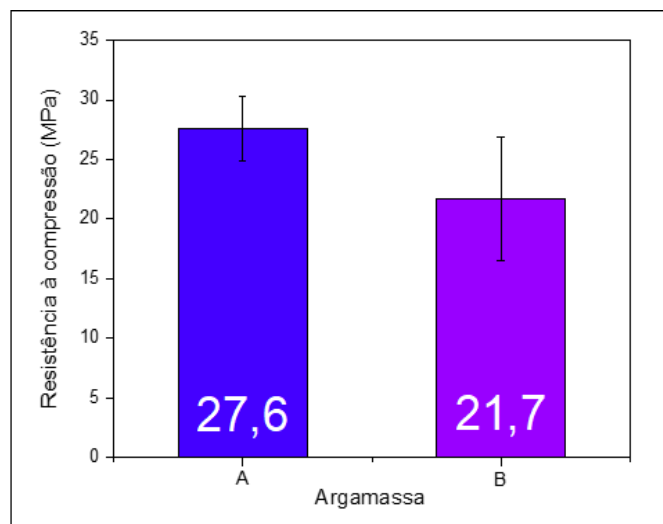


Fonte: Autor (2023).

É possível observar que o cimento possui granulometria menor que o resíduo utilizado, embora estejam próximos, não havendo objeções quanto ao tamanho da partícula para preenchimento de vazios. Sendo assim, as características do RPRO indicam uma atuação para adição mineral com efeito fíler, sendo positiva a sua granulometria próxima ao cimento. Por outro lado, Matins (2009) alerta que a presença de finos provenientes da adição mineral requer um maior percentual de água na relação água/aglomerante, uma vez que a presença de finos demanda mais água em função do aumento da massa específica e, conseqüentemente, possibilitando o aumento da retração linear devido ao aumento de temperatura nas reações de hidratação e, conseqüentemente, gerando a formação de fissura.

A fim de corroborar com esse entendimento, a Figura 19 apresenta os valores de resistência à compressão obtidos através do ensaio de determinação do índice de desempenho com o cimento Portland aos 28 dias, conforme a NBR 5752 (ABNT, 2014).

Figura 19 – Valores de resistência à compressão do ensaio de determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias.



Fonte: Autor (2023).

Sendo A, os corpos de prova apenas com cimento, e B, os corpos de prova com a adição mineral, obteve-se como resultado de IAP do resíduo pó de rocha ornamental 79%, de acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2014), sendo, portanto, classificado como um material pozolânico, por possuir percentual superior a 75%. Todavia, a literatura indica o uso do resíduo de rochas ornamentais com efeito de preenchimento de vazios, como foi utilizado nesta pesquisa.

Corroborando com este entendimento, Topçu, Bilir e Uygunoğlu (2009) utilizaram diferentes percentuais de pó de rocha ornamental em concretos autoadensáveis, concluindo que o preenchimento dos vazios por resíduos de rochas ornamentais atua no empacotamento de partículas, podendo melhorar o arranjo das partículas no sistema; alSato, Galina e Teixeira (2018) indicam que o resíduo pode ser utilizado como adição mineral inerte na matriz cimentícia dada a sua finura e massa específica próxima ao cimento, além de possuir baixa atividade reativa, se comportando com efeito de preenchimento; No estudo

realizado por Bentlemsan, Yahiaoui e Kenai (2023), a utilização do pó de rocha ornamental permite reduzir a porosidade das argamassas autonivelantes, dado o seu efeito fíler.

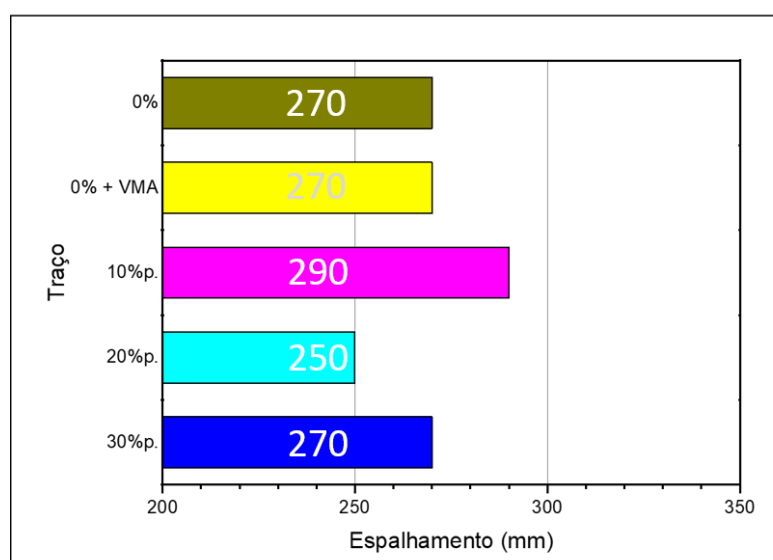
Nessa perspectiva, a adição do resíduo surge como uma adição mineral de um material inerte que agirá como um modificador de viscosidade, preenchendo os vazios (fíler), e aperfeiçoando o material através de suas principais características comerciais.

4.2 EFEITO DA ADIÇÃO DE RPRO NAS PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS AUTONIVELANTES NO ESTADO FRESCO

Para realização da análise do efeito da adição do resíduo pó de rocha ornamental (RPRO) em argamassa autonivelante, inicialmente, serão discutidos os valores obtidos através dos ensaios frescos feitos de acordo com a Efnarc (2002).

Os resultados do ensaio de mini slump podem ser observados na Figura 20. É possível observar que os valores foram satisfatórios quanto a fluidez, não apresentando segregação e/ou exsudação para os diferentes traços com adição mineral, possuindo um diâmetro que variou de 250mm a 290mm. Cabe destacar que para as cinco proporções, manteve-se a relação água/cimento de 0,48.

Figura 20 – Diâmetros de escoamento obtidos através do ensaio de mini slump test.

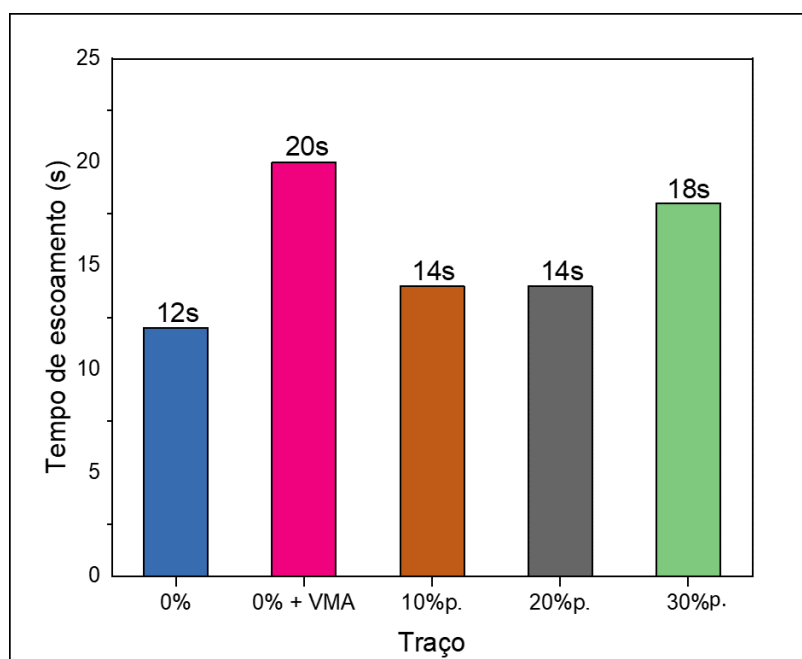


Fonte: Autor (2023).

De acordo com Barluenga e Hernández-Olivares (2010), a argamassa autonivelante deve possuir um diâmetro de 250mm a 300mm. É possível observar que a adição de 20%p. ficou no limite inferior, apresentando um diâmetro de 250mm. Tal fato, se deve ao aumento de finos na composição do traço, quando comparado ao cimento e, conseqüentemente, necessidade de aumento de água ou superplastificante para aumentar a fluidez, a fim de atingir, conseqüentemente, um maior diâmetro de espalhamento. O mesmo não aconteceu com a adição mineral de 30%p., pois houve um aumento no uso de aditivo superplastificante, em consonância com Farias (2019), que afirma a necessidade de aumento desse aditivo em função do aumento de finos, bem como a necessidade de manter a mesma relação água/cimento.

Analisando os três percentuais de adição de RPRO propostos, é possível inferir que a argamassa autonivelante preenche os pré-requisitos de espalhamento. No que tange ao tempo de escoamento, a Figura 21 apresenta os tempos atingidos em cada traço por meio do escoamento da argamassa autonivelante no ensaio de mini slump test.

Figura 21 – Tempo de escoamento cronometrado no ensaio de mini slump test.



Fonte: Autor (2023).

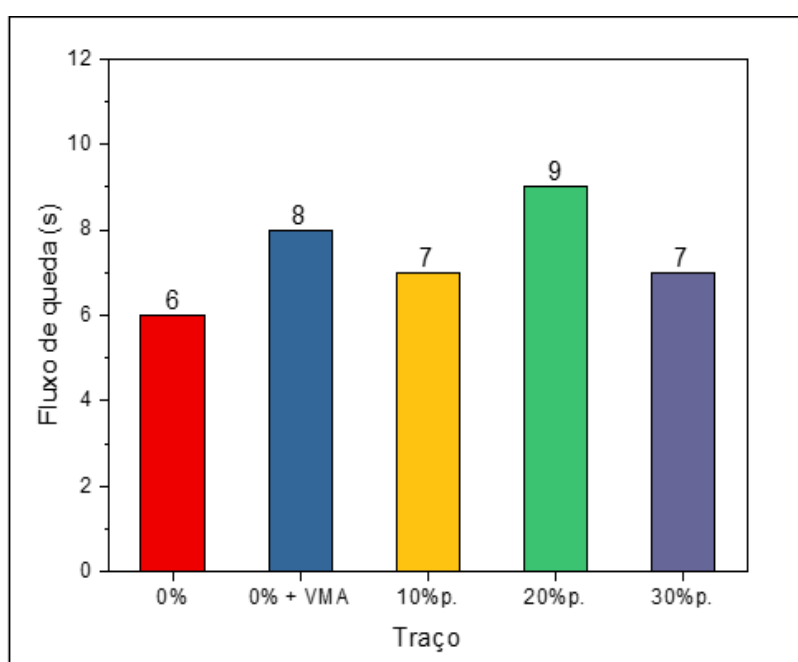
Os traços apresentaram uma variação do tempo de 12 a 20 segundos. O traço padrão 0% + VMA possuiu menor velocidade de escoamento por

apresentar uma adição de 0,06% de aditivo modificador de viscosidade. Percebe-se, também, que os traços propostos de 10%p., 20%p. e 30%p. possuíram uma velocidade inferior ao padrão 0% + VMA, porém com tempo de escoamento superior ao traço padrão 0%, que não contém aditivo modificador de viscosidade e nenhuma adição mineral.

Nessa perspectiva, é possível inferir que o resíduo, nos traços propostos, influenciou na diminuição da velocidade de escoamento da pasta cimentícia, aumentando a sua viscosidade. De acordo com Zhi, Huang e Guo (2017), os resíduos finos, na mistura, se assemelham aos aditivos químicos, atuando como um modificador de viscosidade, garantindo as características de fluidez e trabalhabilidade no estado fresco.

A Figura 22 apresenta o tempo de fluxo de queda da argamassa autonivelante através do ensaio de mini funil V, o qual permite analisar a viscosidade, a velocidade e a habilidade de passar em um funil com formato V.

Figura 22 – Tempo de fluxo de queda cronometrado no ensaio de mini funil V.



Fonte: Autor (2023).

Analisando o gráfico, é possível observar que as cinco proporções possuem tempo de fluxo de queda variando entre 6 e 9 segundos. De acordo com a Efnarc (2002), os valores-alvo de tempo de fluxo devem estar compreendidos de 7 a 11 segundos, isso significa que o traço padrão 0% ficou

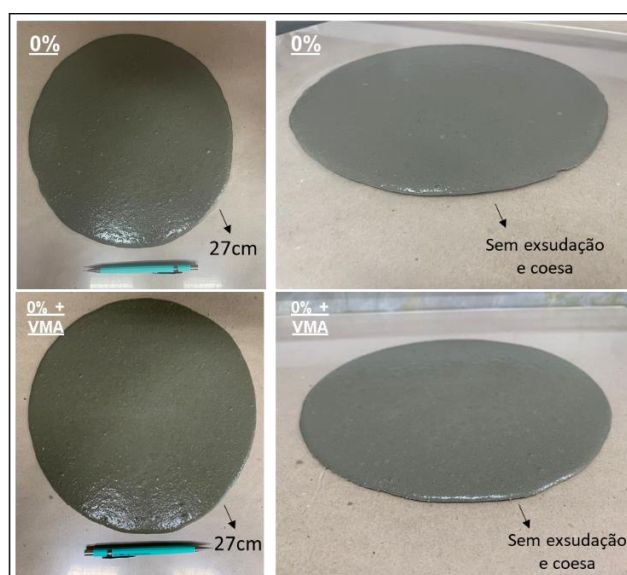
1 segundo abaixo do limite inferior, porém o traço padrão 0% + VMA e os três traços com adição mineral estiveram dentro da faixa apresentada na norma.

Comparando os tempos de fluxo obtidos pelos traços, é possível observar que as argamassas autonivelantes com adição mineral obtiveram semelhança ao traço padrão 0% + VMA, ou seja, ao traço que possui em sua composição o aditivo modificador de viscosidade, podendo inferir, assim, que a adição mineral está contribuindo com o aumento da viscosidade da pasta cimentícia, pois a adição do resíduo pó de rocha ornamental aumenta a viscosidade devido ao aumento das interações entre as partículas finas (Bentlemsan; Yahiaoui; Kenai, 2023).

O traço 20%p. apresentou um tempo superior aos demais, uma possível interpretação está na quantidade de aditivo superplastificante utilizado, o qual tinha o mesmo percentual que o traço de 10%p. que possuía uma quantidade inferior de RPRO. Porém, assim como todos os demais traços, não apresentou sinais de exsudação e nem segregação no ensaio. Tal fato está associado ao tamanho das partículas de RPRO adicionadas, uma vez que o tamanho da partícula da adição mineral influencia nas características de fluxo da argamassa autonivelante (Rizwan; Bier, 2012).

As Figuras 23 e 24 apresentam os registros dos cinco traços realizados nesta pesquisa após o escoamento livre oriundo do ensaio de mini slump.

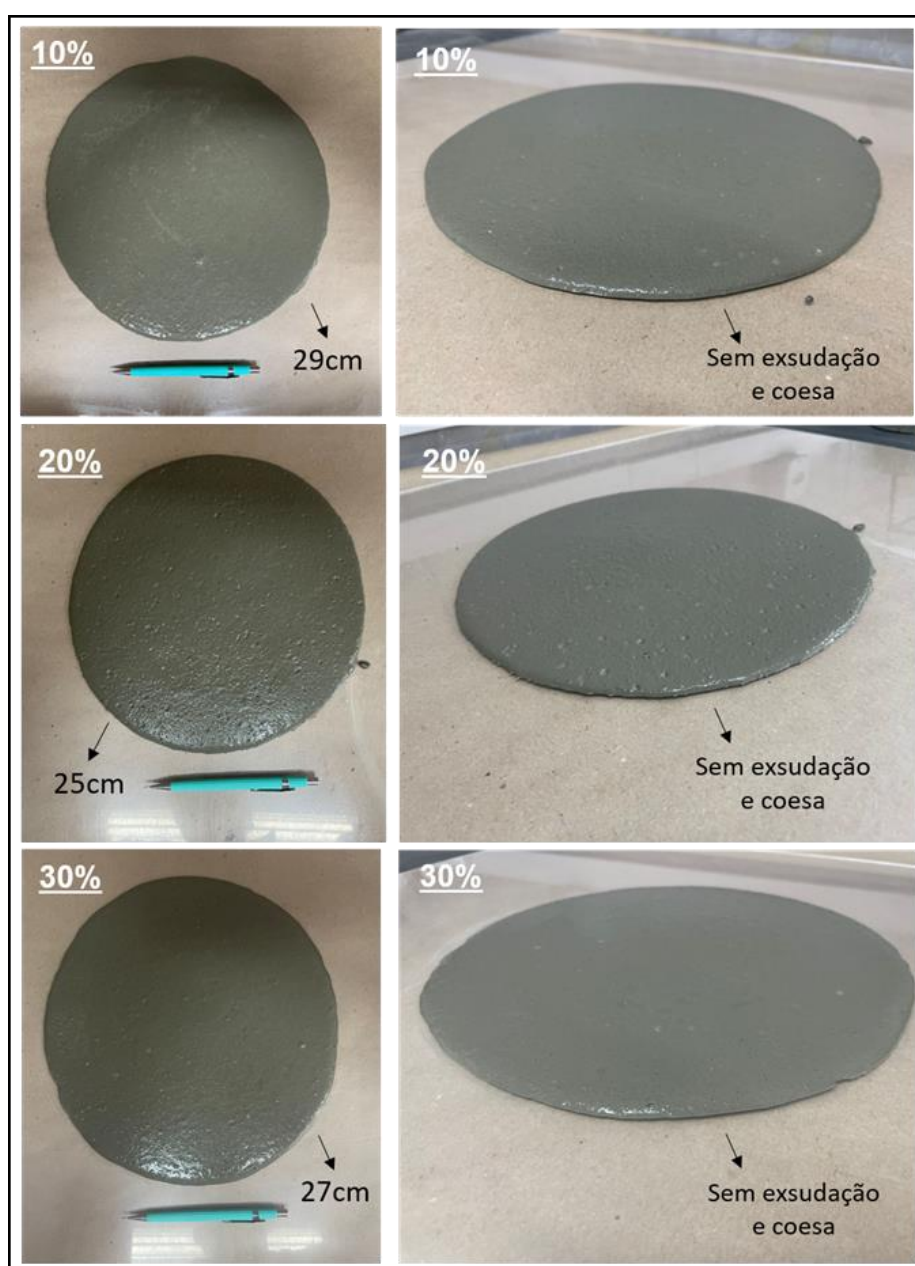
Figura 23 – Índice de estabilidade visual dos traços referência das argamassas autonivelantes produzidas.



Fonte: Arquivo pessoal (2023).

As argamassas padrão, 0% e 0% + VMA, não apresentaram sinais de exsudação e nem segregação, como pode ser observado. De acordo com a NBR 15823-1 (ABNT, 2017), classificam-se como IEV 0 – sem evidência de segregação ou exsudação. Cabe destacar que os dois traços padrão diferem-se entre si pelo uso de 0,06% do aditivo modificador de viscosidade da marca Silka no traço 0% + VMA, apenas; mas ambos os diâmetros obtidos foram de 27cm, com mesmas características visuais.

Figura 24 – Índice de estabilidade visual dos traços com adição de RPRO das argamassas autonivelantes produzidas.

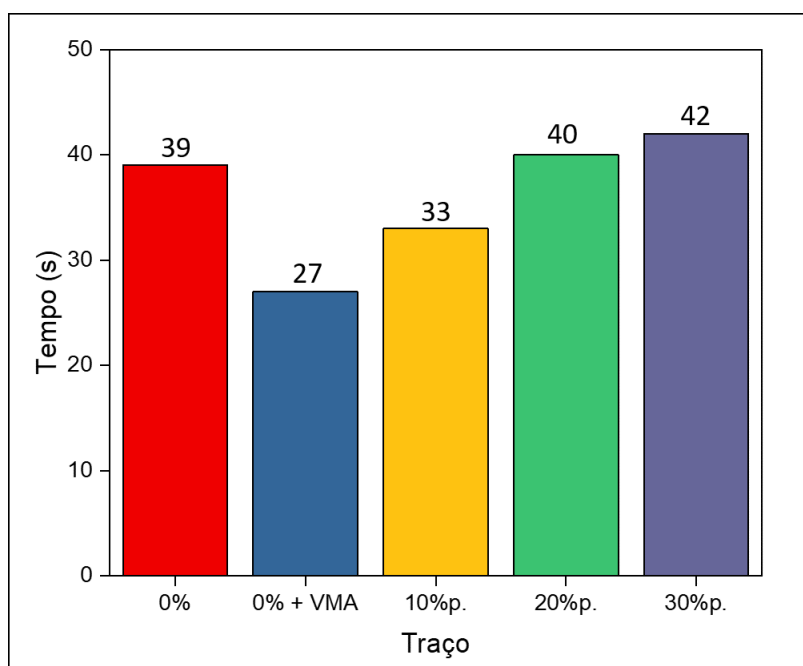


Fonte: Arquivo pessoal (2023).

Observa-se que não houveram diferenças entre os traços referência e os traços propostos com adição de RPRO, não apresentando exsudação e segregação. Assim, classificam-se como IEV 0, sem evidência de segregação ou exsudação. Houveram diferenças relacionadas ao diâmetro obtido nos traços com adição mineral, mas sem interferência nas características do estado fresco de argamassas autonivelantes. Mas é possível observar que o traço 20%p. apresenta uma maior coesão e concentração, estando atrelado ao seu tamanho de diâmetro que é menor, quando comparado com os demais traços.

A Figura 25 apresenta os resultados do ensaio de caixa L adaptado, o qual consistiu em avaliar o tempo de preenchimento da argamassa autonivelante na caixa.

Figura 25 – Resultado do ensaio de caixa L adaptado.



Fonte: Autor (2023).

Através da análise da Figura 25, é possível observar que o tempo de preenchimento da caixa L do traço 0% + VMA foi inferior quando comparado aos demais traços. Analisando os três traços com adição mineral, é possível inferir que ocorreu um aumento da viscosidade, considerando que existiu um tempo superior de preenchimento, bem como não apresentou segregação e exsudação. Por outro lado, observa-se que o traço 0%, o qual não possui adição de modificador de viscosidade e nem mineral, possuiu um tempo de

preenchimento superior ao traço 0% + VMA, porém a argamassa não preencheu toda a caixa, totalizando 80% de preenchimento, diferentemente das demais que preencheram os 100% do espaço.

De acordo com a Efnarc (2002), o ensaio de caixa L é recomendado para concreto autoadensável com o objetivo de analisar a capacidade de passante por obstáculos sem apresentar segregação e exsudação, bem como preencher toda a seção horizontal. Por não possuir normatização para argamassas autonivalantes, analisou-se o preenchimento. Sendo assim, é possível inferir que o traço 0% não atende ao ensaio de caixa L, pois não preencheu toda a seção horizontal. Desse modo, dentre os requisitos estabelecidos, o traço 0% não atende todos os parâmetros de autonivelante.

O Quadro 12 apresenta os resultados do ensaio de retenção de fluxo, relacionado a perda da trabalhabilidade.

Quadro 12 – Resultado do ensaio de retenção de fluxo.

Traço avaliado	Diâmetro de espalhamento 20 min (milímetros)	Diâmetro de espalhamento 30 min (milímetros)	Diferença entre os diâmetros (milímetros)
0%	115	113	2
0% + VMA	144	130	14
10%p.	135	125	10
20%p.	130	124	6
30%p.	145	135	10

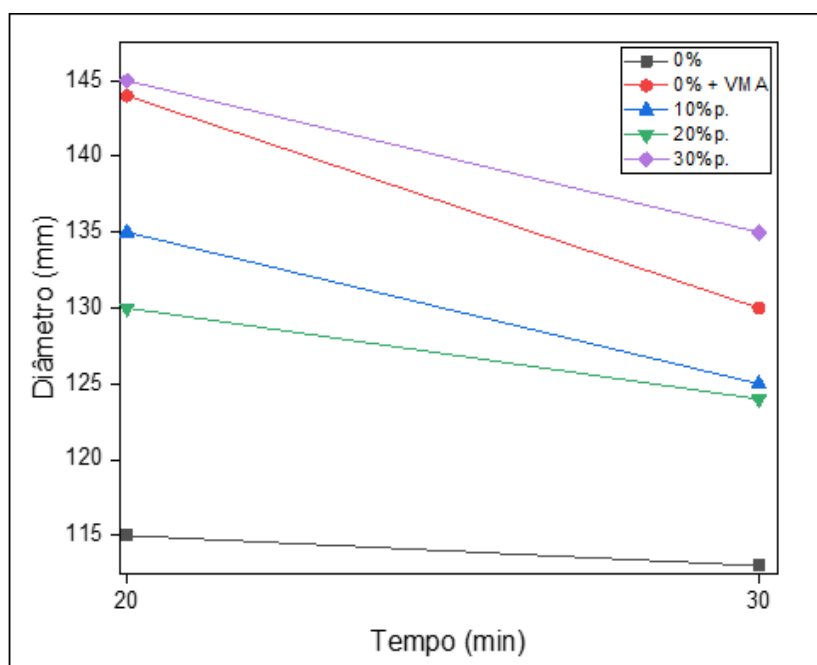
Fonte: Autor (2023).

Analisando os dados apresentados, é possível observar que os traços com adição mineral e com modificador de viscosidade possuíram diâmetros maiores que o traço referência 0%. Por outro lado, a diferença da perda de trabalhabilidade desses traços foi maior, quando comparada com o traço de 0%. A C1708 (ASTM, 2012), não estabelece o diâmetro mínimo e máximo para este ensaio, mas ressalta a importância da trabalhabilidade desse tipo de material cimentício, pois a sua principal característica se encontra no estado fresco para aplicação. Assim, é possível inferir que o traço referência com modificador de viscosidade (0% + VMA) e os traços com adição mineral (10%p., 20%p. e 30%p.), embora tenham diminuído a sua trabalhabilidade aos 30 minutos, ainda

possuem maior capacidade de trabalhabilidade que o traço 0%, pois ainda assim obtêm um maior diâmetro aos 30 minutos.

De acordo com Chaves (2019), a perda acentuada da trabalhabilidade das argamassas com adição mineral e com modificador de viscosidade podem estar associadas a quantidade de finos, causando a retenção de água na mistura, e de polímeros, respectivamente; diferentemente do traço 0%, o qual não possui essas adições na sua mistura. O comportamento da retenção de fluxo dos cinco traços estudados pode ser observado na Figura 26.

Figura 26 – Comportamento de retenção de fluxo ao longo do tempo pelas argamassas autonivelantes.



Fonte: Autor (2023).

É possível observar a perda da trabalhabilidade das argamassas ao longo do tempo. De acordo com Rubin (2015), os valores de retenção de fluxo variam em função dos aditivos e materiais empregados na mistura. Ainda, Gruber *et al.* (2023), afirma que as reações de hidratação do cimento, com o passar do tempo, provocam a retração do volume da pasta com o enrijecimento e, conseqüentemente, a provocam a perda da trabalhabilidade.

Visando contribuir com a análise dos resultados obtidos do estado, o Quadro 13 apresenta os resultados dos ensaios realizados.

Quadro 13 – Resultados dos ensaios das propriedades no estado fresco.

Ensaio	Traço				
	0%	0% + VMA	10%p.	20%p.	30%p.
Mini slump test (mm)	270	270	290	250	270
Mini slump tempo (s)	12	20	14	14	18
Mini funil V (s)	6	8	7	9	7
Caixa L (s)	39	27	33	40	42
Retenção de fluxo 20 min (mm)	115	144	135	130	145
Retenção de fluxo 30 min (mm)	113	130	125	124	135

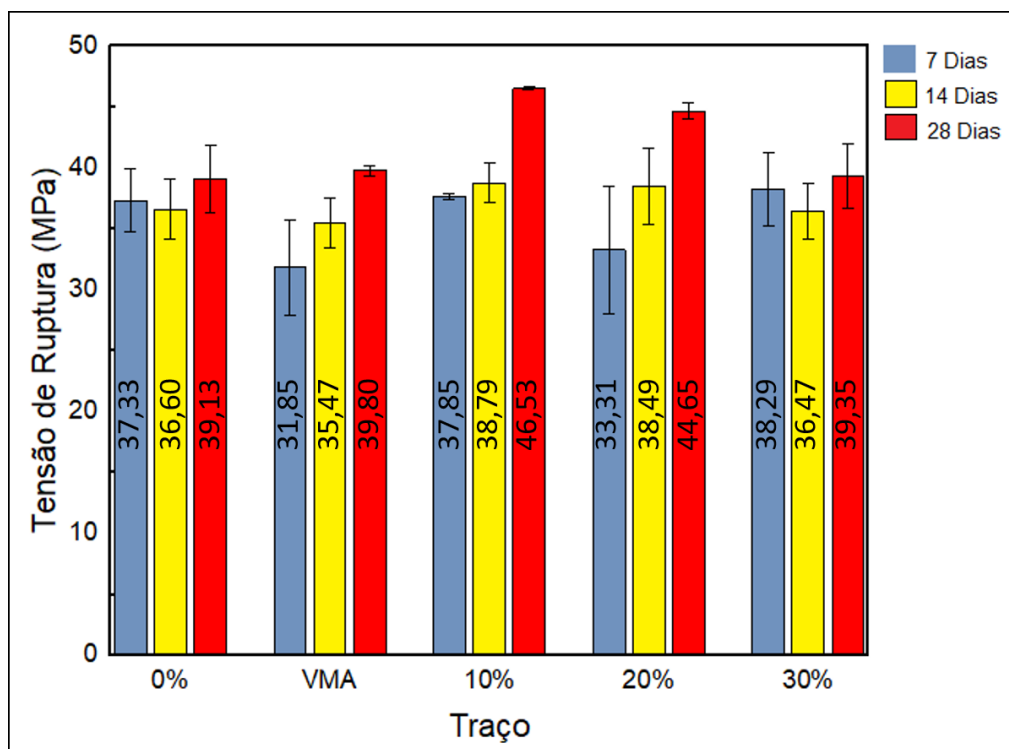
Fonte: Autor (2023).

Com as análises da conjuntura apresentada, conclui-se que os traços trabalhados atendem a todos os requisitos de argamassa autonivelante, com exceção do traço padrão 0%. Destaca-se que 10%p., 20%p. e 30%p., além de atenderem a todos os pré-requisitos no estado fresco, possuem um consumo de cimento inferior aos traços padrão, pois há adição de finos na mistura cimentícia e, também, dada a massa específica do RPRO utilizado. Demonstrando ser uma alternativa sustentável e viável de utilização.

4.3 EFEITO DA ADIÇÃO DE RPRO NAS PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS AUTONIVELANTES NO ESTADO ENDURECIDO

A pesquisa apresentou que as argamassas produzidas, em seu estado endurecido, possuem valores de resistência à compressão que variam entre 39,13 MPa e 46,43 MPa aos 28 dias. A Figura 27 apresenta o gráfico com os resultados da tensão de ruptura dos corpos de prova com idades de 7, 14 e 28 dias.

Figura 27 – Resultados da resistência à compressão aos 7, 14 e 28 dias.



Fonte: Autor (2023).

É possível observar que os traços 10%p., 20%p. e 30%p. apresentaram resistências, aos 28 dias, superiores aos traços padrão, 0% e 0% + VMA, sendo a proporção de 10%p. a que apresentou maior resistência aos 28 dias, com um aumento médio de 16,90% em relação a 0% + VMA. Observa-se, também, que com o aumento da adição mineral passou a ocorrer uma redução da resistência de 4,04% e 15,43% aos 28 dias das formulações 20%p. e 30%p., respectivamente, embora ainda tenham sido superiores a 0% e 0% + VMA na mesma idade; e 30%p. com 0,45 MPa inferior ao traço 0% + VMA. A partir desses dados, e considerando a NBR 11801 (ABNT, 2012), tem-se que as argamassas 10%p. e 20%p. são de alta resistência mecânica para pisos, pois possuem resistência à compressão simples superior a 40 MPa.

No estudo realizado por Araújo (2015), que analisou adição mineral com efeito fíler e com efeito pozolânico, o traço o qual possui adição com efeito de preenchimento (fíler) foi o que obteve melhor desempenho na resistência. Para Siddique e Jang (2020), a adição mineral com efeito fíler em materiais cimentícios promove o preenchimento de vazios entre as partículas de cimento

e agregado miúdo, justificando o aumento da resistência em materiais com adição mineral de granulometria fina.

De acordo com Mendes (2019), a medida que houve o aumento da adição mineral com efeito filler, também ocorreu a redução da resistência a compressão, mas, ambos os traços estudados por ele ainda foram superiores quando comparado ao que não houve adição do resíduo de rocha ornamental. Desse modo, é possível inferir que a redução da resistência à compressão com o aumento da adição mineral pode está atrelada a diminuição do consumo de cimento na formulação da pasta.

A Tabela 1 apresenta a média das resistências à compressão obtidas aos 7, 14 e 28 dias e os desvios padrão correspondentes. Através dela, é possível observar que o traço referência e 30%p. foram os que tiveram menor variação de aumento da resistência dos 7 aos 28 dias.

Tabela 1 – Médias das resistências à compressão e seus respectivos desvios padrão.

Traço	7 dias		14 dias		28 dias	
	Média	Desv. Padrão	Média	Desv. Padrão	Média	Desv. Padrão
0%	37,33	2,55	36,6	2,46	39,13	2,78
0% + VMA	31,85	3,89	35,47	2,02	39,80	0,42
10%p.	37,65	0,21	38,79	1,66	46,53	0,11
20%p.	33,31	5,23	38,49	3,18	44,65	0,64
30%p.	38,29	3,01	36,47	2,27	39,35	2,62

Fonte: Autor (2023).

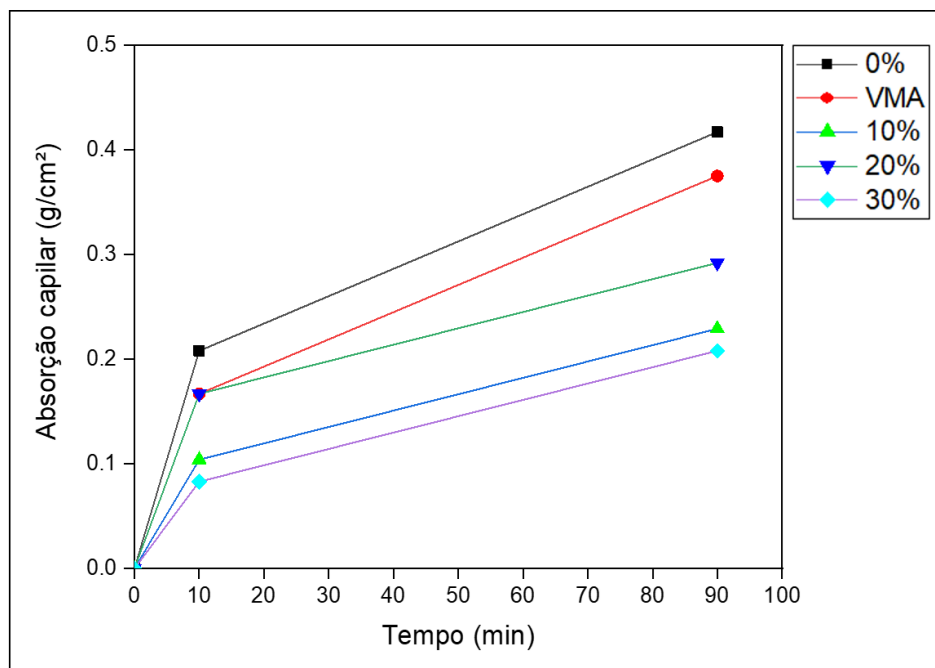
A composição 0% e 0% + VMA se diferem entre si pelo uso de 0,06% de aditivo modificador de viscosidade, utilizando 1,6% de superplastificante. Analisando-as, é possível observar que a segunda composição (0% + VMA) possuiu uma média, aos 28 dias, bem próxima ao traço 0%, com uma diferença decimal entre elas. De acordo com Evaristo, Almeida e Capuzzo (2021), diferentes dosagens desses aditivos não geram diferenças significativas de resistência a compressão; os autores concluíram após analisarem a influência

do aditivo modificador de viscosidade nas propriedades do concreto autoadensável.

Também é possível constatar na Figura 27 e Tabela 1 o aumento significativo da resistência entre a idade de 14 e 28 dias dos corpos de prova. Como a adição mineral de RPRO é inerte, não possuindo atividade pozolânica, Chaves (2019) afirmou que essas partículas auxiliam no aumento elevado da resistência entre essas idades. Outra justificativa para isso é o empacotamento dos grãos de cimento, acelerando o processo de hidratação.

A fim de analisar o efeito fíler do resíduo pó de rocha ornamental na argamassa autonivelante no estado endurecido, a Figura 28 apresenta a representação gráfica da absorção de água por capilaridade.

Figura 28 – Absorção de água por capilaridade das argamassas autonivelantes.



Fonte: Autor (2023).

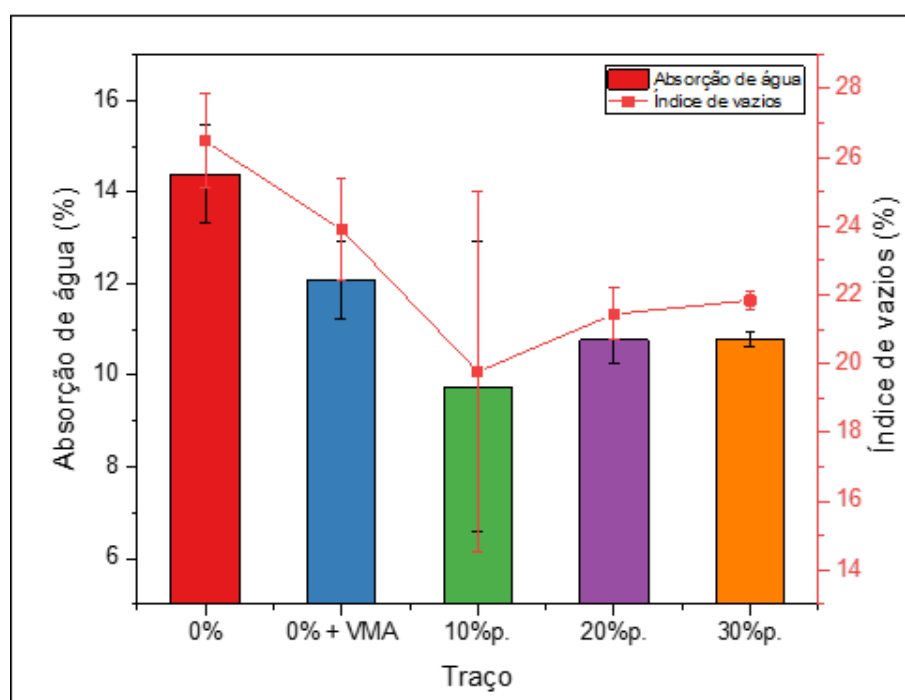
O gráfico mostra que as argamassas com RPRO apresentaram menores absorções de água por capilaridade nos dois tempos, 10 e 90 minutos, quando comparadas com os traços referências 0% e 0% + VMA. Como esse ensaio é uma das maneiras de avaliar a porosidade do material, é possível concluir que as proporções com adição mineral possuem uma menor porosidade, levando a

crer que o resíduo atuou com efeito fíler. O mesmo ocorreu na pesquisa de Kumayama *et al.* (2015), onde o resíduo pó de rocha ornamental utilizado apresentou granulometria semelhante ao cimento e, em adição ao concreto autoadensável, agiu no preenchimento de vazios como um fino.

Conclui-se que a adição mineral nos três traços propostos (10, 20 e 30% em peso) atuou de forma positiva na argamassa, de modo a reduzir a porosidade do material.

Buscando compreender o comportamento do resíduo em adição a pasta cimentícia, tem-se a Figura 29, a qual apresenta a absorção de água e índice de vazios.

Figura 29 – Absorção de água e índice de vazios das argamassas autonivelantes.



Fonte: Autor (2023).

Os resultados apresentados mostram que quanto maior o índice de vazios, maior é a absorção de água do corpo de prova, pois são propriedades que se correlacionam. Desse modo, observa-se que o traço 0%, o qual não possui adição mineral, apresentou uma maior absorção de água e índice de vazios, com 14,38% e 26,48%, respectivamente.

Os corpos de prova com adição mineral obtiveram menor absorção de água e índice de vazios, levando a crer que o resíduo está atuando no

preenchimento de vazios, como um fíler. Mendes (2020), analisou a incorporação de finos de resíduos de rochas ornamentais em argamassa autonivelante, e obteve como resultado uma maior absorção de água e índice de vazios no corpo de prova comercial, sem adição mineral.

Analisando a composição 0% + VMA e os demais traços, observa-se que ocorreu uma redução da absorção de água e índice de vazios quando comparado com 0%. De acordo com Evaristo, Almeida e Capuzzo (2021), a associação entre o aditivo modificador de viscosidade e o superplastificante pode resultar em uma menor incorporação de ar e, conseqüentemente, obter uma quantidade menor de vazios.

É possível relacionar o gráfico de absorção de água e índice de vazios com o gráfico de absorção de água por capilaridade. Entre eles existe uma relação à qual apresenta a diminuição da porosidade com a adição do resíduo pó de rocha ornamental, aumentando o preenchimento de vazios a medida que ocorre o aumento da adição mineral e, conseqüentemente, diminuindo a absorção de água.

A Tabela 2 apresenta a massa específica real (g/cm^3) dos corpos de prova estudados.

Tabela 2 – Massa específica das argamassas estudadas.

Traço	Massa específica (g/cm^3)	Desvio padrão
0%	2,51	0,02
0% + VMA	2,60	0,02
10%p.	2,56	0,02
20%p.	2,54	0,01
30%p.	2,59	0,01

Fonte: Autor (2023).

A massa específica real dos traços estudados variaram de 2,51 a 2,60 g/cm^3 , apresentando baixa diferença entre os diferentes traços. Mas, mediante análise dessas informações, é possível observar que o traço de menor resistência à compressão aos 28 dias (0%) foi o que obteve menor massa específica. Enquanto que os demais traços, seja com adição do modificador de

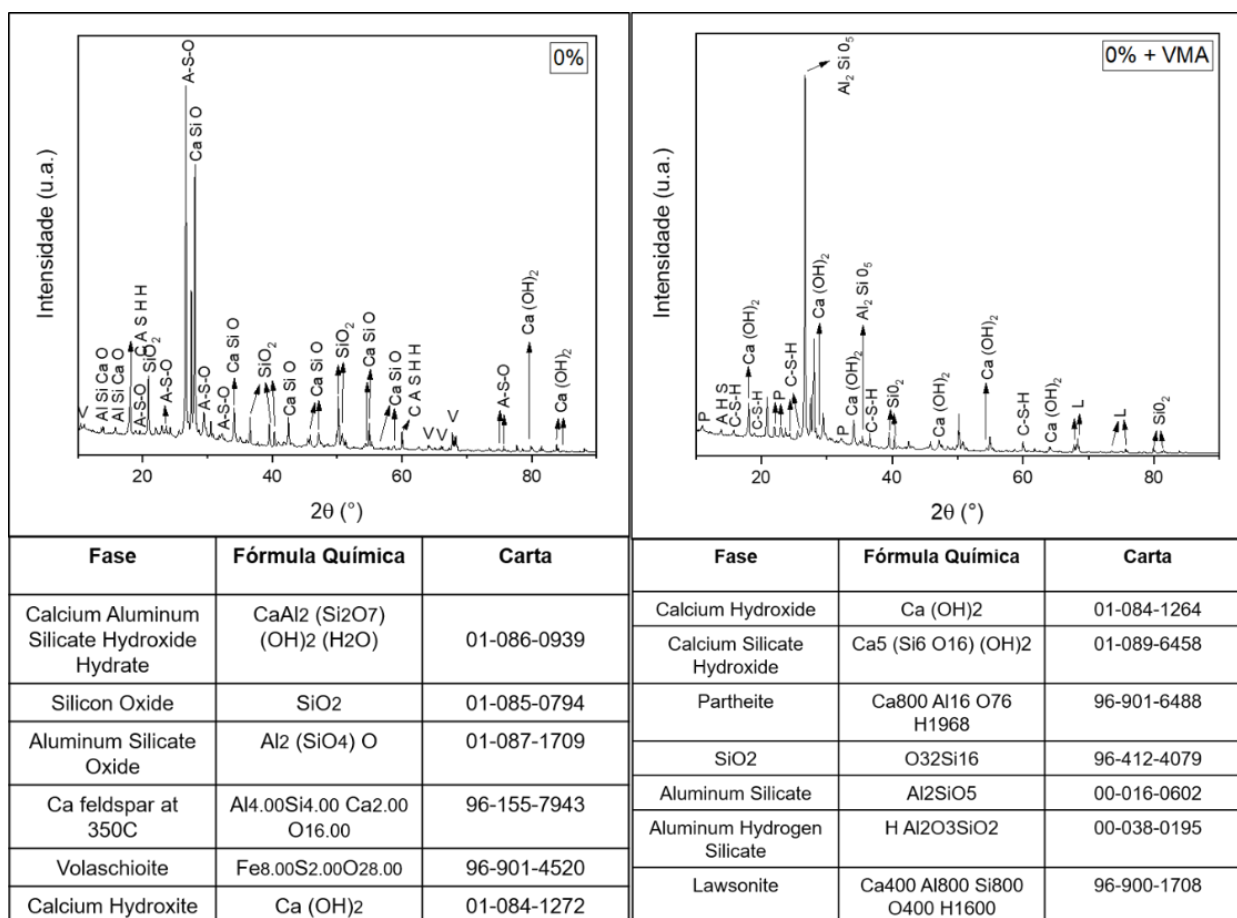
viscosidade, seja com adição mineral, possuíram um aumento no valor dessa propriedade.

Diante da análise da conjuntura apresentada, tem-se que o RPRO atuou, no estado fresco, na melhoria da trabalhabilidade com o aumento da viscosidade e melhora da fluidez da argamassa, e, no estado endurecido, com o aumento da resistência e diminuição do índice de vazios; conseqüentemente, com a redução da absorção de água. Tal afirmação, encontra-se em conformidade com o que foi concluído por Uysal e Yilmaz (2011), onde “o uso de adições minerais em argamassas autonivelantes podem proporcionar melhor trabalhabilidade, empacotamento das partículas e diminuição da permeabilidade”.

Visando correlacionar as propriedades microestruturais com as físico-mecânicas, tem-se os difratogramas das argamassas estudadas, com e sem adição mineral, nas Figuras 30 e 31.

Na Figura 30, apresentam-se os difratogramas dos traços referência.

Figura 30 – Difratogramas dos traços de referência.

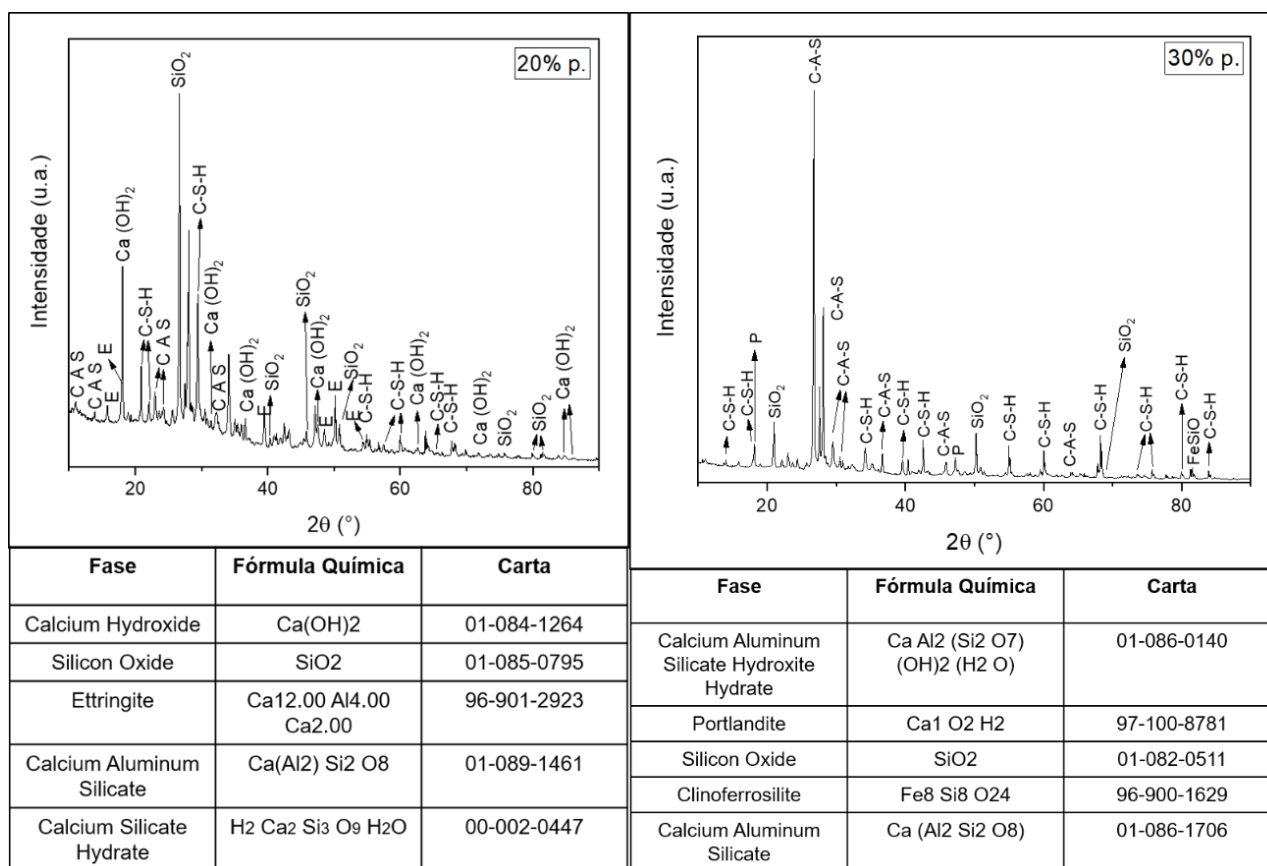


Fonte: Autor (2023).

Os difratogramas apresentam as fases resultantes da hidratação do cimento para as argamassas estudadas, com e sem adição mineral. As seguintes fases foram observadas nos respectivos traços: portlandita (CH), silicato de cálcio hidratado (CSH), silicato aluminato de cálcio hidratado (CASH); apresentando picos de maiores ou menores intensidades. A presença das fases de silicatos favorece o aumento da resistência de concretos e argamassas (Macedo *et al.*, 2020).

A Figura 31 apresenta os difratogramas dos traços com 20% e 30% em peso de RPRO.

Figura 31 – Difratogramas dos traços 20%p. e 30%p.



Fonte: Autor (2023).

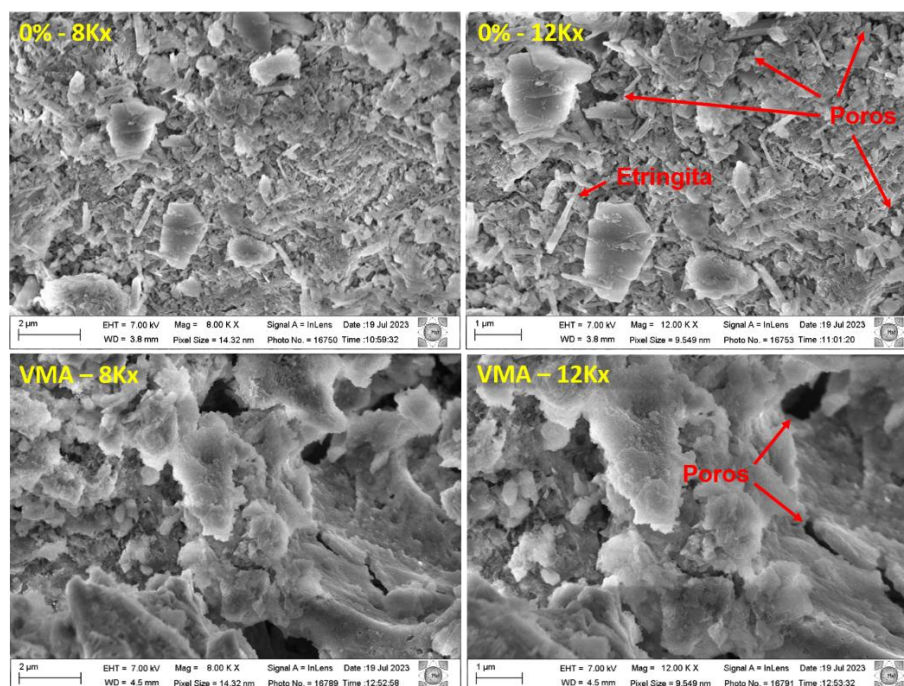
Comparando os difratogramas dos traços padrão com os traços que possuem adição mineral, é possível inferir a presença de mais picos de silicatos e de maiores intensidades nos materiais cimentícios com adição mineral. Tal fato se deve ao empacotamento dos grãos de cimento pelas partículas de RPRO, as

quais aceleraram as reações de hidratação do cimento. Ainda, é possível observar que os gráficos com adição mineral apresentam uma quantidade de picos de SiO_2 superior aos traços padrão. Isso está relacionado a adição de RPRO que é quartzosa, conforme o Quadro 6.

Adicionalmente, os difratogramas apresentados para as argamassas com adição mineral justificam o aumento da resistência das composições propostas que foram apresentadas na Figura 27. E, desta maneira, é possível inferir que os difratogramas de raios-X dos traços estudados estão em conformidade com as composições químicas dos materiais utilizados para a formulação da argamassa autonivelante, bem como com os valores das resistências apresentados pelos corpos de prova, assim como, os valores de absorção de água e índices de vazios.

As micrografias eletrônicas (MEV-FEG) das argamassas estudadas, com e sem adição mineral, são apresentadas nas Figuras 32 e 33, as quais têm-se as morfologias das fases do material cimentício, e a porosidade, assim como a homogeneidade e compacidade da microestrutura das argamassas. As micrografias eletrônicas das argamassas sem adição mineral (0% e 0% + VMA) são mostradas na Figura 32.

Figura 32 – Micrografias eletrônicas (MEV-FEG) das argamassas sem adição mineral (0% e 0% + VMA).

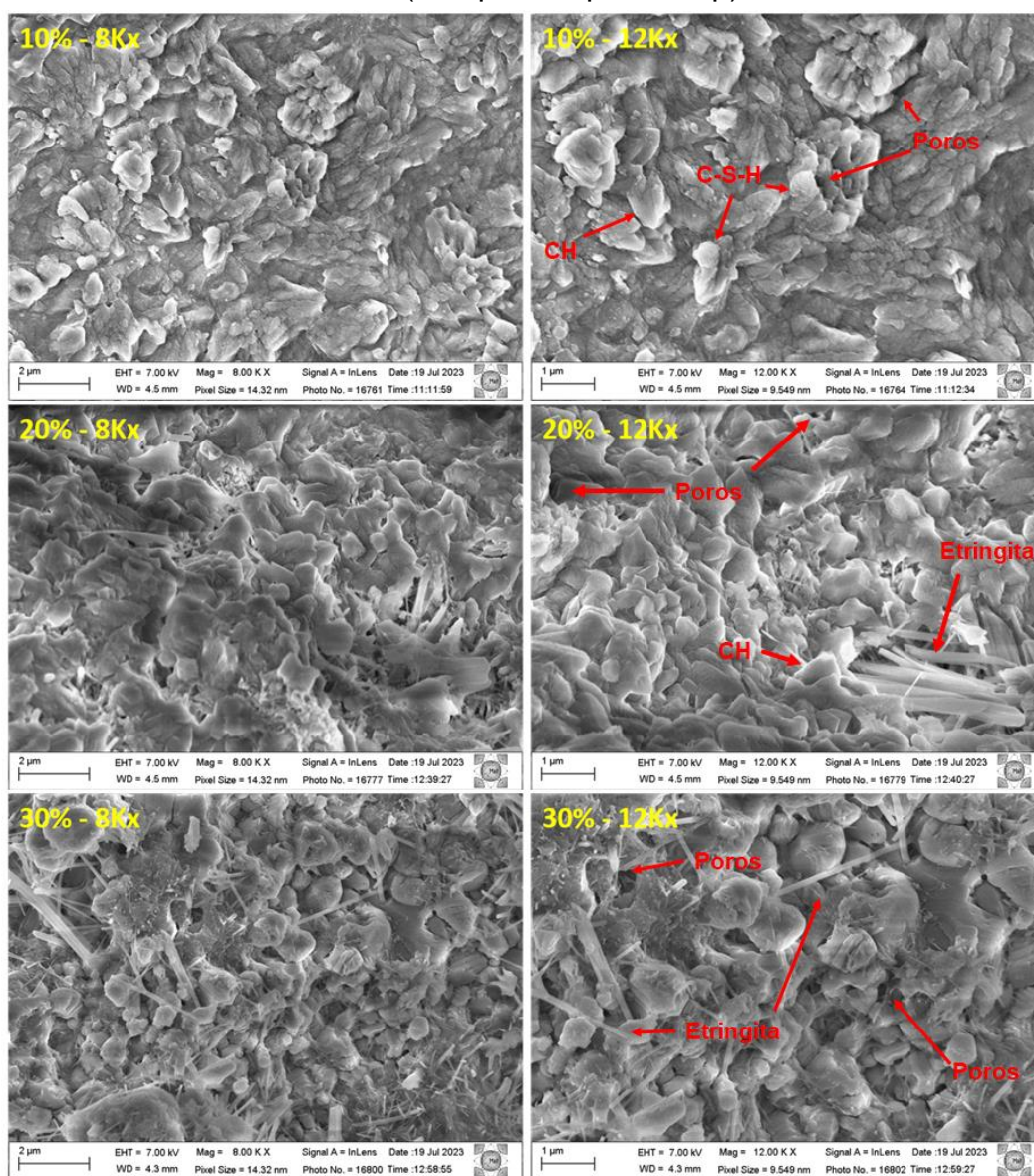


Fonte: Autor (2023).

As micrografias das argamassas padrão apresentaram poros com formas e tamanhos variados. Enquanto que na de 0% foi observada uma microestrutura mais porosa, com poros menores, na de 0% + VMA, têm-se poros com tamanhos maiores e formas variadas, porém mais dispersos.

A Figura 33 apresenta as micrografias eletrônicas das argamassas com adição mineral de RPRO. Nestas foram também observadas as morfologias características das fases de CSH – partículas nanométricas agregadas entre si, de etringita – cristais aciculares, e de CH – cristais em forma de placa (Metha e Monteiro, 2014; Macedo *et al.*, 2020).

Figura 33 – Micrografias eletrônicas das argamassas com adição mineral de RPRO (10%p., 20%p. e 30%p.).

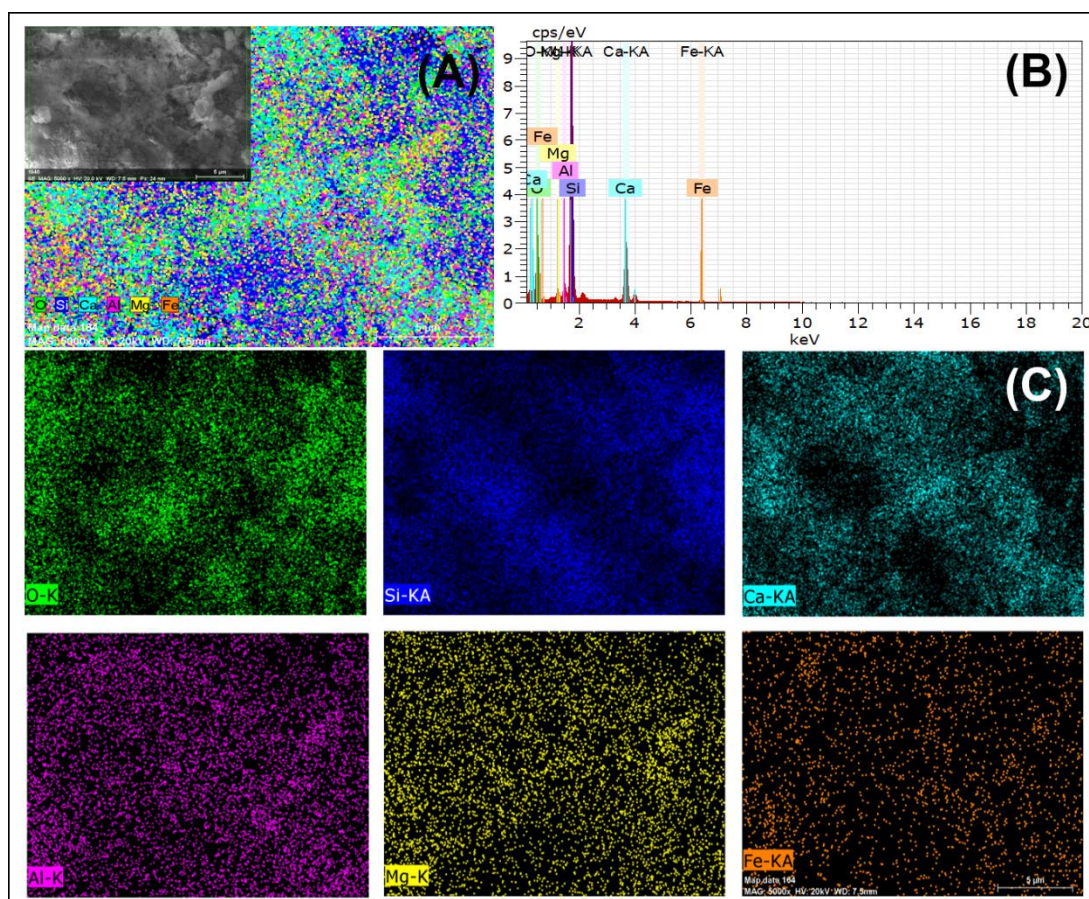


Fonte: Autor (2023).

As microestruturas das argamassas com adição mineral de RPRO (10%p., 20%p. e 30%p) apresentaram maior compacidade e homogeneidade, devido ao efeito de preenchimento de vazios proporcionado pela adição, com obstrução dos poros. Um outro ponto que chama atenção é a presença considerável de etringita na argamassa 20%p., em conformidade com o difratograma, o qual foi o único que apresentou essa fase.

Na Figura 34 é apresentado o mapeamento de elementos químicos através de espectroscopia de energia dispersiva (MEV-FEG-EDS) da argamassa 0% + VMA.

Figura 34 – Mapeamento por EDS da argamassa 0% + VMA. MEV-FEG (A), intensidade dos picos (B) e mapeamento (C).



Fonte: Autor (2023).

Através da micrografia, é possível comprovar os elementos constituintes do material através da sua composição química, em conformidade com a fluorescência de raios-X e difração de raios-X dos materiais da argamassa, além de apresentar correlação com o difratograma.

6 CONCLUSÕES

A necessidade de ações e projetos com foco na economia circular se faz cada vez mais necessária para o alcance das metas dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável propostos pela Organização das Nações Unidas. Nessa perspectiva, o presente trabalho contribuiu com cinco ODSs, a saber:

ODS 9 – Indústria, inovação e infraestrutura: apresentou um produto inovador através do desenvolvimento de uma argamassa autonivelante com adição de resíduos minerais, oriundos da indústria de rochas ornamentais da região Seridó do Rio Grande do Norte;

ODS 11 – Cidades e comunidades sustentáveis: contribuiu com a indústria de construção civil, disponibilizando informações de um produto sustentável o qual, além da utilização de um passivo ambiental que são os resíduos sólidos, promove a diminuição de CO₂ através da redução de consumo do cimento na constituição de argamassas autonivelantes;

ODS 12 – Consumo e produção responsáveis: Surgiu uma destinação prática da utilização do resíduo pó de rocha ornamental provocado por essa atividade, contribuindo com o avanço da economia circular na mineração e, por conseguinte, promovendo uma produção responsável;

ODS 15 – Vida terrestre: A utilização desses resíduos promove o retorno desse material ao sistema produtivo, eliminando e mitigando as pilhas de rejeitos existentes na superfície terrestre;

ODS 17 – Parcerias e meio de implementação: Este projeto de pesquisa, fruto de um mestrado profissional, resultou na parceria entre Instituição de Ensino Superior e a iniciativa privada. A indústria obteve, em contrapartida, um relatório técnico conclusivo, como produção técnica da pesquisa, com informações necessárias e pertinentes para utilização sustentável do passivo ambiental ocasionado por ela, que é o resíduo pó de rocha ornamental (RPRO).

Com base na conjuntura apresentada, e diante dos resultados obtidos e discutidos, tem-se como conclusão da pesquisa teórico-experimental de adição de RPRO em 10%, 20% e 30%, em peso, em argamassas autonivelantes:

1. O resíduo pó de rocha ornamental apresentou potencial para material pozolânico, com somatório acima de 50% da soma dos elementos SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , e percentual menor que 5% de SO_3 , além de índice de atividade pozolânica pelo ensaio de determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias superior a 75%. Por outro lado, sua característica física determinada pela granulometria indica efeito fíler, por possuir tamanho de partícula semelhante ao cimento, bem como a morfologia apresenta partículas com formato irregular e angular; ainda, a literatura indica sua característica como um material fíler.

2. A utilização de RPRO em argamassas autonivelantes proporcionou melhor trabalhabilidade e aumento da viscosidade do material, necessitando de uma maior adição de aditivo superplastificante dado o aumento de finos na composição do traço, porém, atingindo resultados superiores e todos os pré-requisitos de argamassa autonivelante, quando comparados com o traço sem adição mineral e sem adição mineral, mas com modificador de viscosidade.

3. Os traços 10%p., 20%p. e 30%p. apresentaram resistência a compressão superiores e ou igual, no caso de 30%p., quando comparados aos traços referência. Mas, analisou-se que a medida que ocorre o aumento do percentual adicionado de resíduo, existe uma redução da resistência obtida aos 28 dias de cura em água.

4. Os traços referência apresentaram um índice de vazios superior aos traços 10%p., 20%p. e 30%p. e, por conseguinte, obtiveram uma maior absorção de água em imersão. Indica-se que a utilização de RPRO atuou no preenchimento de vazios do material cimentício, proporcionando uma menor absorção de água.

5. Através da absorção de água por capilaridade aos 28 dias, observou-se também que há uma redução da absorção nos traços com adição mineral, corroborando com o indicativo de que o resíduo atuou com efeito fíler, reduzindo os vazios da argamassa. A maior absorção de água ocorreu com 0% e a menor com adição mineral de 30% em peso.

6. A massa específica real dos cinco traços analisados não obtiveram discrepantes variações, mas a menor massa específica foi do traço referência com menor resistência a compressão, o traço 0%.

7. Os traços com adição mineral apresentaram picos de silicatos e com maiores intensidades oriundos da aceleração das reações de hidratação do cimento, justificando a maior resistência à compressão desses traços.

8. As argamassas com adição mineral apresentaram uma morfologia homogênea e com compactação da microestrutura devido ao efeito de preenchimento de vazios proporcionado pela adição de RPRO, com obstrução dos poros.

O resíduo pó de rocha ornamental atuou como um modificador de viscosidade na argamassa autonivelante, contribuindo com a trabalhabilidade do material, viscosidade e fluidez. Embora não existam normas para a adição mineral em argamassas autonivelantes, os traços propostos com adição mineral não apresentaram segregação e exsudação, bem como obtiveram resultados satisfatórios em todos os ensaios realizados no estado fresco. O mesmo ocorreu nas análises realizadas no estado endurecido, com aumento da resistência, diminuição do índice de vazios e compactação dos corpos de prova, os quais possuíram menor número de poros, resultando em uma melhor resistência a compressão.

Nessa perspectiva, surge uma argamassa autonivelante sustentável como alternativa viável para a utilização do resíduo pó de rocha ornamental decorrente da indústria de rochas ornamentais.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA CBIC. **PIB da construção fecha o ano com crescimento de 9,7%, a maior alta em 11 anos.** Elaborado pela Câmara Brasileira da Indústria da Construção. Disponível em: [https://cbic.org.br/pib-da-construcao-fecha-o-ano-com-crescimento-de-97-a-maior-alta-em-11-anos/#:~:text=04%2F03%2F2022-,PIB%20da%20constru%C3%A7%C3%A3o%20fecha%20o%20ano%20com%20ocrescimento%20de%209,sexta%2Dfeira%20\(4\)](https://cbic.org.br/pib-da-construcao-fecha-o-ano-com-crescimento-de-97-a-maior-alta-em-11-anos/#:~:text=04%2F03%2F2022-,PIB%20da%20constru%C3%A7%C3%A3o%20fecha%20o%20ano%20com%20ocrescimento%20de%209,sexta%2Dfeira%20(4).). Acesso em: 12 maio 2022.

AITCIN, Pierre-Claude. **Concreto de alto desempenho.** São Paulo: Pini. 2000. Acesso em: 11 jun. 2023.

ANJOS, Marcos A.s.; CAMÕES, Aires; CAMPOS, Pedro; AZEREDO, Givanildo A.; FERREIRA, Ruan L.s.. **Effect of high volume fly ash and metakaolin with and without hydrated lime on the properties of self-compacting concrete.** Journal Of Building Engineering, [S.L.], v. 27, p. 100985, jan. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.job.2019.100985>.

ARAÚJO, Tomaz Rodrigues 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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11820: Argamassa de alta resistência mecânica para pisos.** Rio de Janeiro: Abnt, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13529: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas.** Rio de Janeiro: ABNT, 1995. 08 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15259: Absorção Por Capilaridade**. Rio de Janeiro: Abnt, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-1: Concreto autoadensável Parte 1: Classificação, controle e recebimento no estado fresco**. Rio de Janeiro: Abnt, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211: Agregados para concreto - Especificação**. Rio de Janeiro: Abnt, 2005. 11 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão**. Rio de Janeiro: Abnt, 1996. 8 p.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15012: Rochas para revestimentos de edificações — Terminologia**. Rio de Janeiro: ABNT, 2013. 23 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó - determinação da massa específica**. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5751: Materiais pozolânicos - determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias**. Rio de Janeiro: Abnt, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. 2 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2005.

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

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

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

ASTM American Society for Testing and Materials. **C 1708: Standard Test Methods for Self-leveling Mortars Containing Hydraulic Cements**. 2012.

BARLUENGA, G.; HERNÁNDEZ-OLIVARES, F. **Self-levelling cement mortar containing grounded slate from quarrying waste**. Construction And Building Materials, [S.L.], v. 24, n. 9, p. 1601-1607, set. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.02.033>.

BAUER, Luiz Alfredo Falcão. **Materiais de Construção**. 5. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2018. 488 p. ISBN 978-85-216-1249-0.

BENTLEMSAN, Nadia; YAHIAOUI, Walid; KENAI, Said. **Strength and durability of self-compacting mortar with waste marble as sand substitution**. Case Studies In Construction Materials, [S.L.], v. 19, p. 2331-2343, dez. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02331>.

BRASIL. Ministério de Ciência e Tecnologia. Centro de Tecnologia Mineral. **Mineração e desenvolvimento sustentável: desafios para o Brasil**. Editor Maria Laura Barreto. Rio de Janeiro: CETEM; MCT, 2001.

CALMON, J. L. et al. **Aproveitamento do Resíduo de Corte de Granito Para a Produção de Argamassas de Assentamento**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 2., Salvador, 1997. Anais... Salvador: ANTAC, 1997^a.

CHAVES, Patrícia da Silva. **Argamassa autonivelante com adição mineral (fíler) de resíduo de beneficiamento de mármore e granito**. 2019. 136 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém, 2019.

COSTA, Marianne do Rocio de Mello Maron da. **Análise comparativa de argamassas colantes de mercado através de parâmetros reológicos**. 2006. 148 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Construção Civil e Urbana, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

DANTAS, Eugênio Pacelli; PEREIRA, Ludmila Bernardo Farias; LIMA, Maria Angélica Batista (org.). **Rochas Ornamentais do Estado do Rio Grande Do Norte: mapa de potencialidades**. Natal: CPRM, 2020. (Série Rochas e Minerais Industriais, N° 27).

EFNARC EUROPEAN FEDERATION FOR SPECIALIST CONSTRUCTION CHEMICALS AND CONCRETE SYSTEMS. **Specification & guidelines for Polymermodified cementitious flooring as wearing surfaces for industrial and comercial use**. United Kingdom, 2002.

ELKINGTON, John. **Canibais com garfo e faca**. São Paulo: M.Books, 2011.

ELKINGTON, John. **Green Swans: The Coming Boom in Regenerative Capitalism**. Nova Iorque (EUA): Fast Company Press, 2020.

EVARISTO, Wilson Flexeiras de Oliveira; ALMEIDA, Victor Ludovico de; CAPUZZO, Valdirene Maria Silva. **Influência do aditivo modificador de viscosidade nas propriedades do concreto autoadensável**. Matéria (Rio de Janeiro), [S.L.], v. 26, n. 3, p. 1-17, 2021. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620210003.13050>.

FARIAS, Evilane Cássia de. **Avaliação da durabilidade frente ao ataque de CO₂ e Cl⁻ em concretos autoadensáveis com elevados teores de resíduo da biomassa da cana-de-açúcar e metacaulim**. 2019. 173 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

GIL, Antônio Carlos. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. São Paulo: Atlas S. A., 2002.

GOVERNO DO DISTRITO FEDERAL. **Agenda 2030: Objetivos do Desenvolvimento Sustentável**. Elaborado pelo Escritório de Assuntos

Internacionais. Disponível em: <https://www.internacional.df.gov.br/agenda-2030-objetivos-do-desenvolvimento-sustentavel/>. Acesso em: 13 maio 2022.

GRUBER, Elayne Thais; EFFTING, Carmeane; SCHACKOW, Adilson; MENDES, Gabriela Azambuja. **Performance evaluation of self-leveling mortars using phosphogypsum and white ceramic waste**. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais, [S.L.], v. 17, n. 1, p. 1-19, 2024. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1983-41952024000100003>.

KUMAYAMA, Rosemarie; ALCÂNTARA, Marco Antonio de Moraes; CRUZ, Willian da Silva; SEGANTINI, Antonio Anderson da Silva. **Estudo da viabilidade do emprego de pó de mármore para produção de concreto auto-adensável e substituição parcial dos agregados por pérolas de poliestireno expandido (eps)**. Reec - Revista Eletrônica de Engenharia Civil, [S.L.], v. 10, n. 2, p. 1-16, 23 set. 2015. Universidade Federal de Goiás. <http://dx.doi.org/10.5216/reec.v10i2.33117>.

MACEDO, A. R. S.; SILVA, A. S.; LUZ, D. S. da; FERREIRA, R. L. S.; LOURENÇO, C. S.; GOMES, U. U.. **Study of the effect of diatomite on physico-mechanical properties of concrete**. Cerâmica, [S.L.], v. 66, n. 377, p. 50-55, mar. 2020. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132020663772561>.

MARTINS, Eliziane Jubanski. **Procedimento para dosagem de pastas para argamassa autonivelante**. 2009. 140 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedade e Materiais**. 2. ed. [s. L.]: Nicole Pagan Hasparyk, 2014.

MELO, Karoline Alves de. **Contribuição à dosagem de concreto autoadensável com adição de fíler calcário**. 2005. 183 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

MENDES, Gabriela Azambuja. **Dosagem de Argamassa Autonivelante Com Adição de Resíduos do Corte de Mármore e Graníticos (RCMG): Análise das Propriedades Físicas e Mecânicas**. 2019. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2019.

MENDONÇA, Ana Maria Gonçalves Duarte et al. **Utilização do resíduo de mármore na produção de argamassa**. Brazilian Journal Of Development, Curitiba, v. 7, n. 5, p. 44238-44247, maio 2021.

MITTRI, S. H. M. *et al.* **Assessment of the pozzolanic activity of ornamental stone waste after heat treatment and its effect on the mechanical properties of concretes**. Revista IBRACON de estruturas e materiais, São Paulo: SciELO - Scientific Electronic Library Online, ano 2018, 18 abr. 2018. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952018000600004>.

NAÇÕES UNIDAS NO BRASIL (org.). **Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil**. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 06 jul. 2022.

NITAHARA, A. Empresa Brasileira de Comunicação (Ebc). **IBGE: construção voltou a crescer em 2019, após dois anos de queda**. 2021. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2021-06/ibge-construcao-voltou-crescer-em-2019-apos-dois-anos-de-queda#:~:text=A%20Pesquisa%20Anual%20da%20Ind%C3%BAstria,14%2C2%20bilh%C3%B5es%20em%20incorpora%C3%A7%C3%B5es..> Acesso em: 12 maio 2022.

NORMA EUROPEIA. **12620: Agregados para concreto**. Bruxelas: Comitê Europeu de Normalização, 2013.

OLIVEIRA, G. A. G., LANGE, L. C. **Gerenciamento dos Resíduos Sólidos Industriais na Área Mineira da Bacia Hidrográfica do Médio São Francisco**. Saneamento Ambiental Brasileiro. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES, 2005. p. 1-13.

OLIVEIRA, M. L. M; AQUINO, J. A.. **Amostragem**. IN: Tratamento de Minérios: práticas laboratoriais. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2007. p. 3-34.

PEREIRA, Valdir M.; CAMARINI, Gladis. **Fresh and Hardened Properties of Self-Leveling Mortars with Porcelain and Red Ceramic Wastes**. Advances In Civil Engineering, [S.L.], v. 2018, p. 1-11, 11 jun. 2018. Hindawi Limited. <http://dx.doi.org/10.1155/2018/6378643>.

PEREIRA, Valdir M.; GERALDO, Rodrigo H.; BALDUSCO, Raphael; CAMARINI, Gladis. **Porcelain waste from electrical insulators in self-leveling mortar: materials characterization and properties**. Journal Of Building Engineering, [S.L.], v. 61, p. 105297, dez. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105297>.

PERLOT, Céline; ROUGEAU, Patrick; DEHAUDT, Sylvain. **Slurry of metakaolin combined with limestone addition for self-compacted concrete. Application for precast industry**. Cement And Concrete Composites, [S.L.], v. 44, p. 50-57, nov. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.07.003>.

PHILIPPI, Arlindo; SOBRAL, Maria; FERNANDES, Valdir; ALBERTO, Carlos. **Desenvolvimento sustentável, interdisciplinaridade e Ciências Ambientais**. Revista Brasileira de Pós-Graduação, [S.L.] Brasília, v. 10, n. 21, p. 509-533, 14 fev. 2014. CAPES. <http://dx.doi.org/10.21713/2358-2332.2013.v10.423>. Disponível em: <https://rbpg.capes.gov.br/index.php/rbpg/article/view/423/353>. Acesso em: 07 jan. 2023.

PINHEIRO, Antonio Carlos da Fonseca Bragança; CRIVELARO, Marcos. **Materiais de Construção**. 3. ed. São Paulo: Érica, 2020. 184 p. ISBN 978-85-365-3274-5.

PONTES, Julio Cesar de; LIMA, Vera Lúcia Antunes de; SILVA, Valdenildo Pedro da. **Impactos ambientais no desmonte de rochas com foco na transição para a economia circular**. Brazilian Journal Of Animal And Environmental Research, [S.L.], v. 3, n. 3, p. 1240-1251, 2020. BJAER - Brazilian Journal of Animal and Environmental Research. <http://dx.doi.org/10.34188/bjaerv3n3-042>.

POPPE, Anne-Mieke; SCHUTTER, Geert de. **Cement hydration in the presence of high filler contents**. Cement And Concrete Research, [S.L.], v. 35,

n. 12, p. 2290-2299, dez. 2005. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.03.008>.

RIO GRANDE DO NORTE. SEDEC/ASSECOM. (org.). **Mineração**. Disponível em:

<http://sedec.rn.gov.br/Conteudo.asp?TRAN=ITEM&TARG=15440&ACT=&PAGE=0&PARM=&LBL=Minera%E7%E3o>. Acesso em: 14 ago. 2021.

RIZWAN, Syed Ali; BIER, Thomas A.. **Blends of limestone powder and fly-ash enhance the response of self-compacting mortars**. Construction And Building Materials, [S.L.], v. 27, n. 1, p. 398-403, fev. 2012. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.030>.

RUBIN, Ariane Prevedello. **Argamassas autonivelantes industrializadas para contrapiso: análise do desempenho físico-mecânico frente as argamassas dosadas em obras**. 2015. 207 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

SANTOS, Marcilene de Abreu; NOGUEIRA, Marlos Henrique Pires; SILVA, Luzilene Souza; GOMES, Laércio Gouvêa. **Análise da viabilidade técnica da substituição parcial de cimento Portland por resíduos da indústria do silício para produção de argamassa**. Rct - Revista de Ciência e Tecnologia, [S.L.], v. 5, n. 9, p. 1-14, 31 dez. 2019. Universidade Federal de Roraima.
<http://dx.doi.org/10.18227/rct.v5i9.5400>.

SATO, V. Y.; GALINA, A. P. L.; TEIXEIRA, J. E. S. L.. **Contribution to the rheological study of cementitious pastes with addition of residues from the processing of ornamental rocks**. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais, [S.L.], v. 11, n. 6, p. 1284-1307, dez. 2018. FapUNIFESP (SciELO).
<http://dx.doi.org/10.1590/s1983-41952018000600007>.

SCOLARO, Taylana Piccinini; ROCHA, Janaíde Cavalcante. **Effect of filler nature on mechanical performance and drying shrinkage of self-leveling mortars**. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais, [S.L.], v. 14, n. 3, p. 1-22, 2021. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1983-41952021000300003>.

SIDDIQUE, Salman; JANG, Jeong Gook. **Assessment of molybdenum mine tailings as filler in cement mortar**. Journal Of Building Engineering, [S.L.], v. 31, p. 1-8, set. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101322>.

SILVA, Luzilene Souza et al. **Incorporação de resíduos de polimento de placas de mármore e granito em argamassas colantes industrializadas AC-I**. Revista de Ciência e Tecnologia, Boa Vista, v. 4, n. 5, p. 1-16, dez. 2018. DOI: <https://doi.org/10.18227/rct.v4i7.5113>.

United Nations. (2015). **Transforming our world: the 2030 agenda for sustainable development**. ONU. Retrieved from <https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld/publication>. Acesso em: 30 de jul. de 2022.

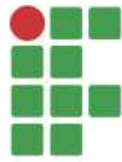
UYSAL, Mucteba; YILMAZ, Kemalettin. **Effect of mineral admixtures on properties of self-compacting concrete**. Cement And Concrete Composites, [S.L.], v. 33, n. 7, p. 771-776, ago. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.04.005>.

VINCO, Luís Gustavo Fiorese *et al.* **Viabilidade técnica e econômica de argamassas de revestimento produzidas com incorporação de resíduos de rochas ornamentais**. Ambiente Construído, Porto Alegre: SciELO - Scientific Electronic Library Online, ano 2017, 25 nov. 2016. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212017000400191>.

YANG, Lin; ZHANG, Yunsheng; YAN, Yun. **Utilization of original phosphogypsum as raw material for the preparation of self-leveling mortar**. Journal of Cleaner Production, Online, ed. 127, p. 204-213, 20 jul. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.054>.

YE, G.; LIU, X.; SCHUTTER, G. de; POPPE, A.-M.; TAERWE, L.. **Influence of limestone powder used as filler in SCC on hydration and microstructure of cement pastes**. Cement And Concrete Composites, [S.L.], v. 29, n. 2, p. 94-102, fev. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.09.003>.

ZHI, Z; HUANG, J; GUO, Y; LU, S; MA, B. **Effect of chemical admixtures on setting time, fluidity and mechanical properties of phosphorus gypsum based self-leveling mortar.** KSCE Journal of Civil Engineering, v. 21, n. 5, p. 1836-1843, 2017.



INSTITUTO FEDERAL
Rio Grande do Norte
Campus Natal-Central



Autor

Djalma Valério Ribeiro Neto

RELATÓRIO TÉCNICO CONCLUSIVO

Estudo da caracterização físico-química e microestrutural do resíduo de rocha ornamental oriundo da empresa Thor Granitos e Mármore LTDA.

Agosto de 2023

Estudo da caracterização físico-química e microestrutural do resíduo de rocha ornamental oriundo da empresa Thor Granitos e Mármore LTDA.

Apresentação

O presente **Relatório Técnico Conclusivo** é fruto de uma pesquisa de mestrado profissional na área de ciências ambientais. Se trata da caracterização físico-química e morfológica do resíduo pó de rocha oriundo do processo de beneficiamento da indústria de rochas ornamentais do município de Parelhas, localizado no Estado do Rio Grande do Norte, com foco na aplicação em argamassas autonivelantes.

Resumo

No Rio Grande do Norte a extração de rochas ornamentais é responsável pela grande geração de resíduos sólidos, dentre eles o pó de rocha ornamental (RPRO). Dessa maneira, visando contribuir com o desenvolvimento sustentável, o presente trabalho possui como objetivo realizar a caracterização de resíduo de RPRO do município de Parelhas-RN. Para isso, realizou-se os ensaios de FRX, DRX, granulometria a laser e MEV. Através do estudo realizado, verificou-se viabilidade técnica de utilização desse resíduo na indústria de construção civil, com adição em argamassas. A amostra contém predominância de sílica; em menores proporções óxido de potássio, óxido de ferro, óxido de fósforo, óxido de alumina e óxido de cálcio. O resultado de DRX apresenta predominância de fases mineralógicas cristalinas. Na análise de MEV, a amostra apresenta partículas de tamanhos variados, com morfologia irregular e angular. Possui diâmetro médio de partícula de 18.71 μ m. O resíduo caracterizado possui potencial de efeito filer para adições minerais em argamassas autonivelantes.

Procedimento experimental

O pó de rocha ornamental é o resíduo oriundo do processo de corte dos blocos de rochas. A coleta do resíduo de RPRO utilizado neste estudo ocorreu na região Seridó do Rio Grande do Norte, no município de Parelhas-RN, na empresa Thor Granitos e Mármore LTDA, em destaque na Figura 02.

Figura 1 – Mapa de localização do município de Parelhas-RN.

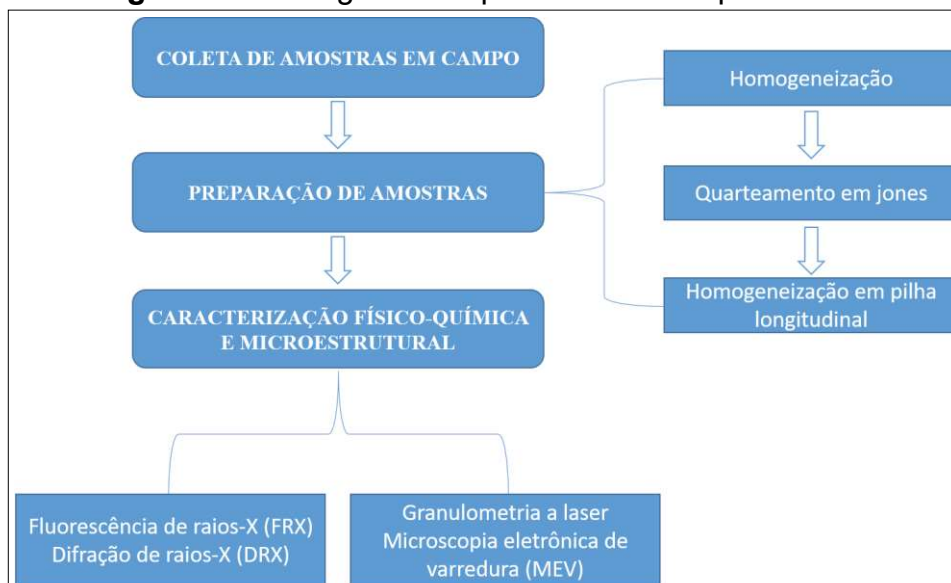


Fonte: Os autores (2023).

Em uma pilha de resíduos, a amostra foi coletada em diferentes pontos *in loco* a fim de obtê-la de maneira representativa, a qual foi identificada como RPRO-PAR. Posteriormente, foi encaminhada para o Laboratório de Tecnologia Mineral e Materiais (LT2M) do IFRN *Campus* Natal-Central.

Após coletada, o procedimento experimental se deu em três etapas, a saber: homogeneização e quarteamento da matéria-prima, com objetivo de se obter alíquotas representativas para as etapas posteriores, caracterização físico-química com análises de fluorescência de raios-X (FRX) e difração de raios X (DRX) e caracterização microestrutural com análises de granulometria a laser e microscopia eletrônica de varredura (MEV). A Figura 3 apresenta o Fluxograma do procedimento experimental.

Figura 2 – Fluxograma do procedimento experimental.



Fonte: Os autores (2023).

De modo a garantir uma amostragem acurada e precisa (Oleira e Aquino, 2007), realizou-se a homogeneização da amostra e posterior quarteamento em quarteador do tipo jones com 3/8" de abertura construída em chapa de aço galvanizado, dividindo a amostra em 50%. Em seguida, uma das frações foi homogeneizada através do procedimento de pilha longitudinal, conforme apresenta a Figura 4. Ao final, obteve-se uma fração de 5g de RPRO-PAR para os ensaios de caracterização.

Figura 3 – Pilha longitudinal da amostra.



Fonte: Arquivo pessoal (2023).

Em seguida, realizou-se o ensaio de fluorescência de raios X (FRX) através do equipamento FRX portátil Thermo Scientific Niton XL3T. Acondicionadas em um saco plástico, a amostra foi enviada ao Laboratório de Caracterização Mineral e Resíduos (Lacamm) do IFRN para as análises de difração de raios X (DRX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV), e para a granulometria a laser a amostra foi enviada para o Laboratório de Pesquisa em Petróleo (Lapet) da UFRN.

O DRX ocorreu através do equipamento Diffractometer X-RAY XDR-7000 por meio de um método não destrutivo; a leitura se deu com angulação de 10 a 80°. Para o MEV a amostra foi metalizada e a análise ocorreu no equipamento Tescan VEGA 3 com um aumento de 5 mil vezes. Já a granulometria, ocorreu por meio do equipamento Cilas modelo 1064.

Resultados

O resultado da fluorescência de raios X foi obtido após análise em um FRX do tipo portátil. O Quadro 1 apresenta o resultado da análise realiza.

Quadro 1 – Análise de FRX do resíduo pó de rocha ornamental de Parelhas/RN.

Óxidos	SiO ₂	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	SO ₃	MnO	MgO
Percentuais (%)	72,93	8,72	6,16	4,00	3,63	3,19	0,66	0,37	0,32	< LOD

Fonte: Os autores (2023).

Assim, é possível identificar que a amostra de RPRO-PAR é composta, em sua maioria, por óxido de silício, com teores menores de óxido de potássio, óxido de ferro, óxido de fósforo, óxido de alumínio e óxido de cálcio. E, ainda, com teores menores que 1%, apareceu os óxidos de titânio, enxofre, manganês e o óxido de magnésio, sendo este último presente na amostra, mas não quantificado pelo método de análise realizado.

Com um alto percentual em relação ao todo, nota-se o percentual de 72,93% de óxido de silício, indicando a presença de silicatos, como por exemplo o quartzo. Apresenta também elementos do grupo dos feldspatos com percentuais superiores a 10%, que são o potássio (K₂O) e a alumina (Al₂O₃).

Analisando o Quadro 2 o qual apresenta o percentual em óxido dos elementos que compõem os materiais pozolânicos (classe E) e o RPRO-PAR,

foi observado que o resíduo pó de rocha ornamental pode ser classificado como um material pozolânico de classe E por possuir a soma dos elementos SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ igual a 83,04%, de acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2014).

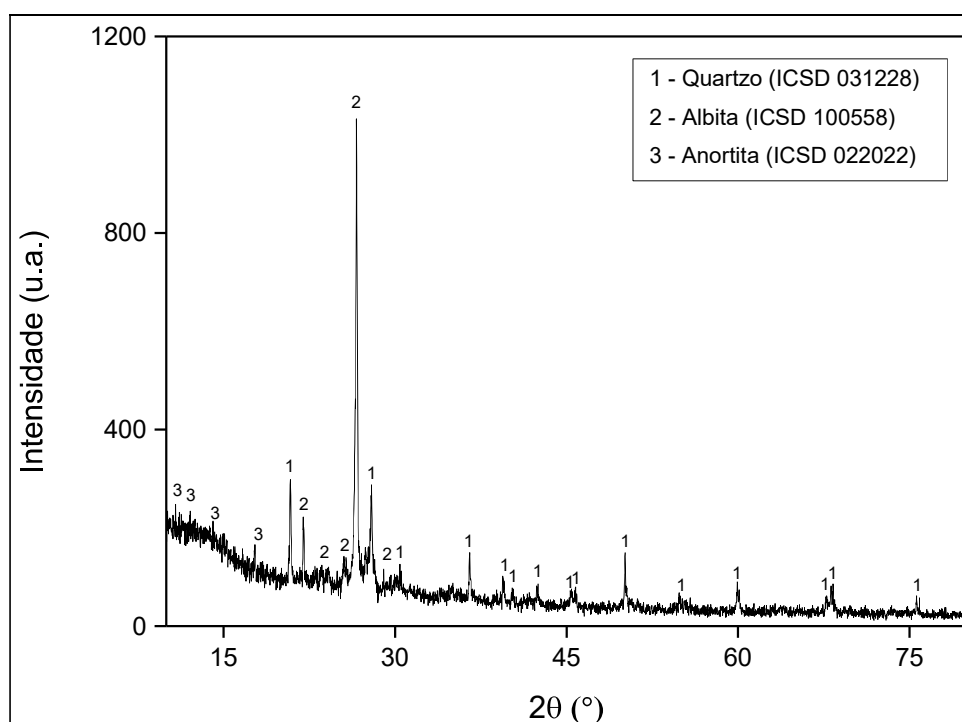
Quadro 2 – Percentual de elementos químicos para materiais pozolânicos.

PROPRIEDADES	Classe de material pozolânico	RPRO
	E	E
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	≥ 50%	82,72
SO ₃	≤ 5%	0,37

Fonte: Adaptado ABNT NBR 12653 (2014).

O resultado da análise de difração de raios X do resíduo pó de rocha ornamental do município de Parelhas-RN se encontra na Figura 5.

Figura 4 – Difratoograma do resíduo pó de rocha ornamental (RPRO)



Fonte: Os autores (2023).

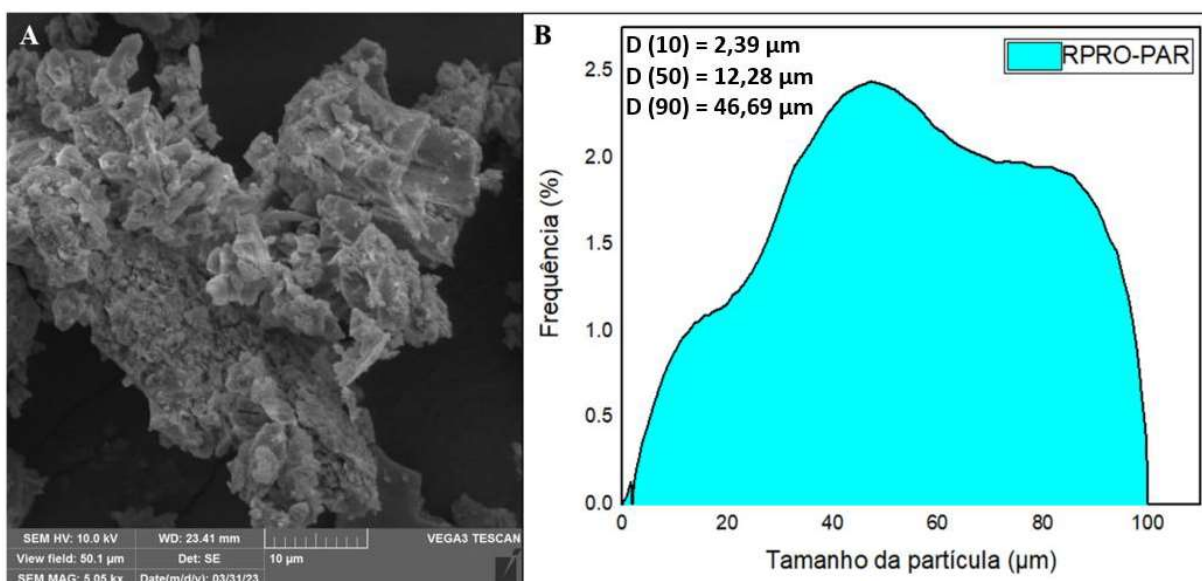
O difratograma do RPRO-PAR apresenta predominantemente a fase cristalina, com picos característicos de quartzo, albita e anortita, representando a estrutura mineralógica do material. Ainda, destaca-se a conformidade com o resultado da análise de fluorescência de raios X realizada. O difratograma do resíduo aponta que a mineralogia é constituída por quartzo, o qual é oriundo predominantemente de rochas graníticas (Dantas, 2020). Além disso, o ensaio

de DRX auxiliou na avaliação da reatividade do material através da identificação de fases amorfas e cristalinas dos minerais. Há intensa quantidade de picos (fases cristalinas), ao contrário da fase amorfa que se caracteriza por apresentar curvas com ausência de picos, o que indicaria uma maior reatividade do material.

Através da análise realizada de DRX e, também, da literatura (Chaves, 2019), o resultado aponta para um resíduo que não apresenta atividade pozolânica, à princípio. Portanto, observa-se que apesar do grande percentual de óxido (ABNT, 2014) assinalando-o como material pozolânico, o resíduo apresenta pouca fase amorfa, podendo ser classificado inicialmente como fíler, conforme Barluenga e Hernández-Olivares (2010).

A Figura 6 apresenta a micrografia do resíduo o gráfico de distribuição do tamanho de partícula.

Figura 5 – Microscopia eletrônica de varredura do resíduo (A) e distribuição do tamanho de partícula (B).



Fonte: Os autores (2023).

Através da micrografia, é possível observar que as partículas apresentam diâmetros variados, distribuindo-se de maneira heterogênea, com morfologia irregular e angular. Com relação ao tamanho de partícula, a amostra apresentou tendência de comportamento trimodal, com distribuição de tamanhos D (10) = 2,62 μm ; D (50) = 15,10 μm ; D (90) = 59,06 μm e uma partícula média de 23,84 μm .

Com tais características, o resíduo estudado possivelmente pode influenciar no preenchimento dos poros em argamassas, proporcionando maior

compacidade na estrutura cimentícia (Chaves, 2019). Possui características de efeito fíler quando adicionados em argamassas autonivelantes, em conformidade ao que foi apresentado por Mendes, Effting e Schackow (2020).

Com essas características, o resíduo pó de rocha ornamental de Parelhas-RN pode ser considerado como uma adição mineral de preenchimento de vazios, de acordo com o que foi apresentado por Sato, Galina e Teixeira (2018). Através do efeito de preenchimento na mistura cimentícia, o resíduo passa a se assemelhar aos aditivos químicos, atuando como um modificador de viscosidade, garantindo as características de fluidez e trabalhabilidade no estado fresco (Zhi; Huang; Guo, 2017).

Conclusões

Através da caracterização físico-química e microestrutural do resíduo oriundo do corte de blocos de rochas ornamentais, o resíduo pó de rocha ornamental, foi possível compreender as suas características e, conseqüentemente, inferir que podem ser aplicados como adição mineral em argamassas autonivelantes através do preenchimento de vazios, atuando com efeito fíler.

Com relação a análise de fluorescência de raios-X, apresenta composição predominante de sílica (SiO_2), e elementos como óxido de potássio, óxido de fósforo, óxido de ferro, óxido de alumina e óxido de cálcio. O difratograma possui fase mineralógica cristalina, sendo possível inferir que não reagem ao cimento quando utilizados como adição mineral em argamassas, além de proporcionar aceleração nas reações de hidratação.

No que se refere a microscopia eletrônica de varredura, a imagem com aumento de 5000x apresenta partículas com morfologia irregular de formato angular, além de tamanhos variados, distribuindo-se de forma heterogênea. O gráfico de distribuição do tamanho de partícula apresentou tendência de curva trimodal.

Com a conjuntura exposta, tem-se o resíduo pó de rocha ornamental como uma matéria-prima para a indústria de construção civil, mais especificamente para a formulação de argamassas, pois a sua aplicação nesse material irá auxiliar na mitigação dos impactos ambientais adversos decorrentes da indústria de rocha ornamental e, em paralelo, reduzir a emissão de CO_2 ao ambiente

oriundo do processo de fabricação do cimento pois, com a adição mineral em argamassas, ocorre a diminuição do consumo de cimento, uma vez que o material cimentício passa a conter uma maior quantidade de materiais finos.

Referências

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

BARLUENGA, G.; HERNÁNDEZ-OLIVARES, F. Self-levelling cement mortar containing grounded slate from quarrying waste. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 24, n. 9, p. 1601-1607, set. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.02.033>.

CHAVES, P.S. Argamassa autonivelante com adição mineral (filler) de resíduo de beneficiamento de mármore e granito. Dissertação de mestrado. **Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil**. Universidade Federal do Pará, 2019.

DANTAS, Eugênio Pacelli; PEREIRA, Ludmila Bernardo Farias; LIMA, Maria Angélica Batista (org.). **Rochas Ornamentais do Estado do Rio Grande Do Norte: mapa de potencialidades**. Natal: CPRM, 2020. (Série Rochas e Minerais Industriais, N° 27).

MENDES, Gabriela Azambuja; EFFTING, Carneane; SCHACKOW, Adilson. Argamassa autonivelante com adição de resíduos de mármore e granitos: propriedades físicas e mecânicas. **Ambiente Construído**, [S.L.], v. 20, n. 3, p. 403-418, jul. 2020. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212020000300436>.

ZHI, Z; HUANG, J; GUO, Y; LU, S; MA, B. **Effect of chemical admixtures on setting time, fluidity and mechanical properties of phosphorus gypsum based self-leveling mortar**. KSCE Journal of Civil Engineering, v. 21, n. 5, p. 1836-1843, 2017.

ANEXO



FICHA TÉCNICA DE PRODUTO

Sika® Pump

Aditivo modificador reológico para concreto bombeado

DESCRIÇÃO DO PRODUTO

Sika® Pump é um versátil aditivo para concreto e argamassa que melhora o bombeamento e as propriedades reológicas do concreto, protegendo os equipamentos e tubulações do desgaste excessivo.

USOS

- Sika® Pump é utilizado principalmente em misturas de concreto com baixo consumo de cimento ou com agregados de granulometria descontínua, com baixa retenção de água e segregação, que exige alta pressão de bombeamento.
- Mesmo com tubulação extensa e elevado número de pavimentos o concreto ou argamassa podem ser bombeados sem pressão excessiva utilizando Sika® Pump.

CARACTERÍSTICAS / VANTAGENS

- Sika® Pump aumenta a coesão e homogeneidade do concreto
- Aumenta a tendência do concreto fresco ao deslizamento, reduzindo, por consequência, a pressão de bombeamento
- Sika® Pump não tem efeitos negativos sobre as propriedades do concreto endurecido.
- Sika® Pump Aumenta a vida útil das bombas de concreto
- Reduz / elimina as frequentes interrupções por entupimentos devido a obstrução das tubulações

DADOS DO PRODUTO

Base química	Solução de polímeros modificadores de viscosidade
Embalagem	Tambor de 200 litros, Containeres de 1000 litros e Granel.
Aspecto / Cor	Líquido pegajoso amarelo
Prazo de validade	12 meses a partir da data de produção se estocado apropriadamente, nas embalagens originais e intactas.
Condições de estocagem	Armazenar em local seco e temperaturas entre +5°C e +30°C. Protegido da luz direta do sol e do gelo.
Densidade	1,00 ± 0,05 kg/L
Valor do pH	9,0 ± 1,0

INFORMAÇÃO SOBRE A APLICAÇÃO

- Dosagem recomendada**
- De 0,2 a 0,4% (200 a 400 g para cada 100 kg de cimento Portland) em relação ao peso do cimento para aumentar a coesão do concreto de difícil mistura.

Ficha Técnica de Produto
Sika® Pump
Fevereiro 2017, Versão 01.01
02140401.100000001

- De 0,5 a 1,5% (0,5 a 1,5 kg para cada 100 kg de cimento Portland) em relação ao peso do cimento, para redução da pressão de bombeamento e compensar a perda de finos. Testes preliminares são necessários para determinar a dosagem exata em condições específicas. Entre em contato com o Departamento Técnico da Sika Brasil para obter mais informações e assistência.

Compatibilidade	Este aditivo é compatível com outros aditivos da linha Sika, para tanto, sugere-se entrar em contato com o Departamento Técnico Sika Brasil.
Dispensador	Adicionar o Sika® Pump após todos os outros componentes (inclusive outros aditivos) e homogeneizar por pelo menos 2 minutos. Nunca adicionar o Sika® Pump com os componentes secos do concreto (cimento e agregados).

VALOR BASE DO PRODUTO

Todos os dados técnicos aqui contidos são baseados em testes de laboratórios. Medidas de valores em condições reais podem variar devido a condições fora de nosso controle.

RESTRIÇÕES LOCAIS

Para maiores informações sobre manuseio, estocagem e disposição dos resíduos consulte a versão mais recente de nossa Ficha de Segurança do Material que contém os dados disponíveis, das propriedades físicas, de ecologia, de toxicidade, e outros dados de segurança pertinentes.

ECOLOGIA, SAÚDE E SEGURANÇA

Todos os dados técnicos aqui contidos são baseados em testes em laboratório. Valores medidos em condições reais podem variar devido a fatores fora de nosso controle. **SEGURANÇA:** Recomendamos o uso de equipamento de proteção individual adequado (óculos de segurança, luvas de borracha sintética e roupa de proteção) durante o tempo de manuseio do produto. Mantenha o produto fora do alcance de crianças e animais domésticos. **PRIMEIROS SOCORROS:** Para mais informações, consulte a Ficha de Informações sobre Segurança de Produtos Químicos (FISPQ). Em caso de ingestão, não induza o vômito e procure imediatamente um médico, levando consigo a embalagem original do produto ou a FISPQ. Em caso de emergência, contate PRÓ-QUÍMICA® 24 Horas Brasil: 0800-11-8270. Não reutilize as embalagens contaminadas com produtos. Descarte em local adequado, incluindo os resíduos gerados após o consumo, conforme regulamentação local vigente. Recomendamos que sejam recicladas somente embalagens não contaminadas pelo produto.

Sika S.A.

Av. Doutor Alberto Jackson Bygton,
1525
Vila Menck, CEP-06276-000 - Osasco - SP
Fone: 0800 703 7340
bra.sika.com



Ficha Técnica de Produto

Sika® Pump

Fevereiro 2017, Versão 01.01
021404011000000001

NOTA LEGAL

As informações e, em particular, as recomendações relacionadas à aplicação e à utilização final dos produtos Sika® são fornecidas de boa-fé e baseadas no conhecimento e na experiência de uso desses produtos, desde que devidamente armazenados, manuseados e aplicados em condições normais. Na prática, as variações no estado do material, nas superfícies e nas condições de aplicação em campo são de tal forma imprevisíveis que nenhuma garantia a respeito da comercialização ou aptidão de um determinado produto para um determinado fim, nem quaisquer responsabilidades decorrentes de qualquer relacionamento legal entre as partes poderão ser inferidas dessas informações ou de quaisquer recomendações dadas por escrito ou por qualquer outro meio. Os direitos de propriedade de terceiros deverão ser observados. Todas as encomendas aceitas estão sujeitas às condições de venda e de entrega vigentes. Os usuários deverão sempre consultar as versões mais recentes das fichas técnicas de cada produto (disponíveis mediante solicitação).

SikaPump-pt-BR-(02-2017)-1-1.pdf