



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS  
MESTRADO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS

Íngride Pamilly Ribeiro Araújo de Oliveira

**Contribuições mecânicas e térmicas do resíduo da scheelita na viabilidade de argamassa  
para revestimento de produção convencional**

MOSSORÓ

2024

Íngride Pamilly Ribeiro Araújo de Oliveira

**Contribuições mecânicas e térmicas do resíduo da scheelita na viabilidade de argamassa  
para revestimento de produção convencional**

Dissertação apresentada ao Mestrado em  
Ciência e Engenharia de Materiais do  
Programa de Pós-Graduação em Ciência e  
Engenharia de Materiais da Universidade  
Federal Rural do Semi-Árido como requisito  
para obtenção do título de Mestra em Ciência e  
Engenharia de Materiais.

Linha de Pesquisa: Aplicações tecnológicas de  
materiais regionais.

Orientador: Rodrigo Nogueira de Codes, Prof.  
Dr.

Coorientador: Alisson Gadelha de Medeiros,  
Prof. Dr.

MOSSORÓ

2024

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

048c    Oliveira, Íngride Pamilly Ribeiro Araújo de.  
         Contribuições mecânicas e térmicas do resíduo da  
         scheelita na viabilidade de argamassa para  
         revestimento de produção convencional / Íngride  
         Pamilly Ribeiro Araújo de Oliveira. - 2024.  
         95 f. : il.

         Orientador: Rodrigo Nogueira de Codes.  
         Coorientador: Alisson Gadelha de Medeiros.  
         Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal  
         Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em  
         Ciência e Engenharia de Materiais, 2024.

         1. Construção civil. 2. Indústria de mineração.  
         3. Sustentabilidade. 4. Dosagem de materiais. 5.  
         Desempenho térmico. I. Codes, Rodrigo Nogueira de  
         , orient. II. Medeiros, Alisson Gadelha de, co-  
         orient. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade  
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).  
Biblioteca Campus Mossoró / Setor de Informação e Referência  
Bibliotecária: Keina Cristina Santos Sousa e Silva  
CRB: 15/120

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

Íngride Pamilly Ribeiro Araújo de Oliveira

**Contribuições mecânicas e térmicas do resíduo da scheelita na viabilidade de argamassa  
para revestimento de produção convencional**

Dissertação apresentada ao Mestrado em  
Ciência e Engenharia de Materiais do  
Programa de Pós-Graduação em Ciência e  
Engenharia de Materiais da Universidade  
Federal Rural do Semi-Árido como requisito  
para obtenção do título de Mestra em Ciência e  
Engenharia de Materiais.

Linha de Pesquisa: Aplicações tecnológicas de  
materiais regionais.

Defendida em: 28/08/2024.

**BANCA EXAMINADORA**

Rodrigo Nogueira de Codes, Prof. Dr. (UFERSA)  
Presidente

Alisson Gadelha de Medeiros, Prof. Dr. (UFERSA)  
Coorientador

Walney Gomes da Silva, Prof. Dr. (IFRN)  
Membro Examinador

Marilia Pereira de Oliveira, Prof.<sup>a</sup> Dra. (UFERSA)  
Membro Examinador

*Dedico aos meus pais, Lucineide e Verione,  
minha fonte de amor, força e coragem.  
Minha inspiração diária.*

## **AGRADECIMENTOS**

Gratidão a Deus, meu amigo fiel e companheiro, que esteve ao meu lado em todos os momentos. Obrigada por me abençoar, proteger e iluminar o meu caminho, por cuidar tão bem de mim. A ti Deus toda honra e toda glória. Agradeço a Maria Santíssima por cobrir-me com teu manto de amor e pela sua intercessão ao teu filho Jesus.

Gratidão aos meus pais, Maria Lucineide e Manoel Verione, pelo amor incondicional, por estarem sempre ao meu lado apoiando e orientando o meu caminho, por ajudarem a realizar os meus pequenos e grandes sonhos. Gratidão a minha irmã, Luanna Paskally, pela irmandade, por todo amor e cuidado, por dividir a vida comigo, por nunca soltar a minha mão.

Gratidão ao meu amigo e namorado, Túlyo Maia, pela amizade, apoio e companheirismo, por ser aquela pessoa ao qual eu sempre posso contar, independentemente do dia e da hora está disposto a me ajudar.

Gratidão ao meu orientador, Rodrigo Codes e ao coorientador Alisson Gadelha, pela atenção, disponibilidade, incentivo, orientações e o conhecimento compartilhado.

Gratidão a professora Marília Pereira pelos ensinamentos e acompanhamento ao longo do estágio de docência. Agradeço também aos professores Walney Gomes, Sabir Khan, Bruno Tiago, Rodrigo Santiago e George Marinho por contribuírem para o desenvolvimento deste trabalho.

Gratidão a Ricardo Alan, Edgley Paula e Rudna Angélica, amigos que encontrei ao longo desta jornada e que me ajudaram a torná-la mais leve.

Gratidão a Mina Brejuí pelo resíduo de scheelita doado para a realização desta pesquisa. E ao engenheiro Brunno Andrade pela disponibilidade e atenção.

Gratidão aos técnicos do Laboratório de Materiais de Construção (UFERSA), Laboratório de Ensaios Mecânicos (UFERSA), Laboratório de Microscopia Eletrônica (UFERSA), Laboratório de Construção Civil (IFRN), Centro de Síntese e Análise de Materiais Avançados (UERN), Laboratório de Cimentos (UFRN), Laboratório de Transferência de Calor (UFRN) e do Laboratório de Raios X (UFC), pelo apoio prestado durante a realização dos ensaios.

Gratidão a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro concedido ao desenvolvimento desta pesquisa.

## RESUMO

Os processos de produção industrial causam impactos ambientais, muitos deles ocasionados pelo consumo excessivo de recursos naturais e a geração de resíduos. O que é notório na construção civil e nas indústrias de mineração. As atividades de mineração da scheelita do semiárido potiguar geram resíduos, sendo acumulados sobre o solo, proporcionando degradações ambientais na região das minas. A construção civil se destaca por consumir recursos naturais em quantidades significativas, um grande exemplo é a utilização de agregados como a areia quartzosa. Diante da necessidade de destinar adequadamente esses resíduos da scheelita e de minimizar a utilização da areia natural como agregado miúdo na produção de argamassas, o objetivo geral desta pesquisa é viabilizar um traço de argamassa de revestimento incorporada do resíduo de scheelita compatível para produção convencional. Para tanto, realizou-se a caracterização física, microestrutural, química e mineralógica do resíduo de scheelita grosso (RSG) e da areia quartzosa natural (AQ). Buscou-se a melhor compatibilização granulométrica entre os agregados utilizados para obter as porcentagens de resíduo de scheelita grosso que substituem parcialmente a areia quartzosa. O traço foi definido conforme um método de dosagem indicado na literatura. As propriedades físicas e mecânicas das argamassas foram analisadas por ensaios no estado fresco (índice de consistência, densidade de massa, teor de ar incorporado) e no estado endurecido (densidade de massa aparente, absorção de água por capilaridade, coeficiente de capilaridade, resistência à tração na flexão, resistência potencial de aderência à tração ao substrato e superficial). Quanto as propriedades térmicas, foram determinadas a condutividade, a resistividade, a difusividade e a capacidade calorífica volumétrica. Com o intuito de verificar o desempenho térmico de paredes externas idealizadas revestidas com as argamassas objetos de estudo desta pesquisa, foram aferidas a transmitância e a capacidade térmica. Através dos ensaios de caracterizações, constatou-se que o RSG pode ser utilizado como agregado miúdo em argamassas de revestimento, pois apresenta características físicas e químicas semelhantes às da AQ. Para um índice de consistência de  $260 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$ , as argamassas constituídas com RSG demandaram de uma menor quantidade de água quando comparadas com a argamassa de referência e apresentaram maiores densidades de massa no estado fresco e endurecido. A argamassa composta por 100% AQ apresentou menor teor de ar incorporado. Os valores de absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade foram estatisticamente todos iguais. As argamassas constituídas por RSG possuem valores de resistência à tração na flexão próximos à argamassa de referência. Os resultados da resistência potencial de aderência à tração ao substrato e superficial foram satisfatórios. As argamassas compostas por RSG apresentaram menor condutividade térmica e maior resistividade térmica quando comparadas a argamassa constituída apenas por AQ. Quanto à capacidade calorífica volumétrica e a difusividade térmica, não houve variação estatística significativa entre os valores obtidos. O desempenho térmico dos sistemas de vedações verticais externas analisados foi atendido nas oito zonas bioclimáticas brasileiras. Por fim, as argamassas com incorporação de resíduo de scheelita grosso apresentam propriedades mecânicas e térmicas viáveis à utilização como argamassa de revestimento convencional.

**Palavras-chave:** construção civil; indústria de mineração; sustentabilidade; dosagem de materiais; desempenho térmico.

## ABSTRACT

Industrial production processes cause environmental impacts, many of which are caused by the excessive consumption of natural resources and waste generation. This is notable in civil construction and mining industries. The scheelite mining activities in the semi-arid region of Rio Grande do Norte generate waste, which is accumulated on the soil, causing environmental degradation in the mining region. The construction industry stands out for consuming natural resources in significant quantities, exemplified by the use of aggregates such as quartz sand. Given the need to properly dispose of this scheelite waste and minimize the use of natural sand as fine aggregate in the production of mortars, the general objective of this research is to develop a viable coating mortar mixture incorporating scheelite waste compatible with conventional production. To this purpose, it was carried out the physical, microstructural, chemical and mineralogical characterization of coarse scheelite waste (CSW) and natural quartz sand (QS). The aim was to achieve the best granulometric compatibility between the aggregates used to obtain the percentages of coarse scheelite residue that partially replace the quartz sand. The mix was defined according to a dosage method indicated in the literature. The physical and mechanical properties of the mortars were analyzed by tests in the fresh state (consistency index, mass density, incorporated air content) and in the hardened state (apparent mass density, water absorption by capillarity, capillarity coefficient, flexural tensile strength, potential tensile adhesion strength to the substrate and surface). As for the thermal properties, the conductivity, resistivity, diffusivity and volumetric heat capacity were determined. In order to verify the thermal performance of idealized external walls coated with the mortars studied in this research, the transmittance and thermal capacity were measured. Through the characterization tests, it was found that CSW can be used as a fine aggregate in coating mortars, since it presents similar physical and chemical characteristics to QS. For a consistency index of  $260 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$ , the mortars made with CSW required a lower amount of water when compared to the reference mortar and presented higher mass densities in the fresh and hardened state. The mortar composed of 100% QS had a lower incorporated air content. The values of water absorption by capillarity and capillarity coefficient were statistically all the same. Mortars made from CSW have flexural tensile strength values close to those of the reference mortar. The results of potential tensile adhesion strength to the substrate and surface were satisfactory. The mortars composed of CSW presented lower thermal conductivity and higher thermal resistivity when compared to the mortar composed only of QS. Regarding the volumetric heat capacity and thermal diffusivity, there was no statistically significant variation between the values obtained. The thermal performance of the analyzed external vertical sealing systems was met in the eight Brazilian bioclimatic zones. Finally, the mortars incorporating coarse scheelite residue present mechanical and thermal properties that are viable for use as conventional coating mortars.

**Keywords:** civil construction; mining industry; sustainability; material dosage; thermal performance.

## LISTA DE FIGURAS

|           |   |                                                                                                                                        |    |
|-----------|---|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1  | – | Revestimentos de parede: emboço + reboco + pintura (a); camada única + pintura (b); revestimento decorativo monocamada (RDM) (c) ..... | 23 |
| Figura 2  | – | Rochas fragmentadas no interior da mina .....                                                                                          | 34 |
| Figura 3  | – | Grelha .....                                                                                                                           | 34 |
| Figura 4  | – | Separação do granulado, misto e resíduo na mesa vibratória .....                                                                       | 35 |
| Figura 5  | – | Dunas de resíduo grosso da scheelita .....                                                                                             | 35 |
| Figura 6  | – | Lama seca depositada ao ar livre .....                                                                                                 | 36 |
| Figura 7  | – | Zoneamento bioclimático brasileiro .....                                                                                               | 39 |
| Figura 8  | – | Fluxograma do procedimento experimental .....                                                                                          | 40 |
| Figura 9  | – | Agregados miúdos utilizados nas argamassas de revestimento: resíduo de scheelita grosso (a) e areia quartzosa natural (b) .....        | 41 |
| Figura 10 | – | Ensaio de determinação da composição granulométrica .....                                                                              | 42 |
| Figura 11 | – | Determinação do material fino que passa pela peneira de 75 µm por lavagem: resíduo de scheelita grosso (a) e areia quartzosa (b) ..... | 43 |
| Figura 12 | – | Ensaio de massa específica real do cimento Portland (CP II-F-32 RS) .....                                                              | 44 |
| Figura 13 | – | Equipamento que realiza o processo de metalização .....                                                                                | 45 |
| Figura 14 | – | Microscópio Tescan Vega 3 LMU (República Tcheca) realizando o ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) .....                | 45 |
| Figura 15 | – | Realização de ensaio para determinação do índice de consistência .....                                                                 | 50 |
| Figura 16 | – | Ensaio de densidade de massa no estado endurecido .....                                                                                | 51 |
| Figura 17 | – | Ensaio de absorção de água por capilaridade .....                                                                                      | 51 |
| Figura 18 | – | Ensaio de resistência à tração na flexão .....                                                                                         | 52 |
| Figura 19 | – | Ensaio de resistência potencial de aderência à tração ao substrato e superficial .....                                                 | 53 |
| Figura 20 | – | Corpos de prova para realização do ensaio térmico .....                                                                                | 54 |
| Figura 21 | – | Ensaio térmico com o equipamento KD2 Pro Thermal Analyzer .....                                                                        | 54 |
| Figura 22 | – | Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com ampliação de 30x: resíduo de scheelita grosso (a) e areia quartzosa (b) ..... | 58 |
| Figura 23 | – | Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com ampliação de 80x: resíduo de scheelita grosso (a) e areia quartzosa (b) ..... | 59 |

|           |   |                                                                                                                                                                          |    |
|-----------|---|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 24 | – | Rupturas de maior ocorrência no ensaio de resistência de aderência à tração ao substrato: ruptura na interface substrato/argamassa (a) e ruptura na argamassa (b) .....  | 78 |
| Figura 25 | – | Rupturas ocorridas no ensaio de resistência de aderência à tração superficial: ruptura no interior do revestimento (a) e ruptura da superfície do revestimento (b) ..... | 81 |

## LISTA DE GRÁFICOS

|            |   |                                                                                                                            |    |
|------------|---|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gráfico 1  | – | Curvas granulométricas do resíduo de scheelita grosso e da areia quartzosa.....                                            | 56 |
| Gráfico 2  | – | Caracterização mineralógica do resíduo de scheelita grosso – DRX .....                                                     | 60 |
| Gráfico 3  | – | Caracterização mineralógica da areia quartzosa – DRX .....                                                                 | 61 |
| Gráfico 4  | – | Curvas granulométricas .....                                                                                               | 63 |
| Gráfico 5  | – | Curvas granulométricas das misturas teóricas e experimentais .....                                                         | 65 |
| Gráfico 6  | – | Curvas de empacotamento: 88% RSG + 12% ARP 1,18 (a); 87% RSG + 13% ARP 2,36 (b); 100% RSG (c) e 100% AQ (REF) (d) .....    | 68 |
| Gráfico 7  | – | Densidade de massa aparente no estado endurecido das argamassas produzidas com teste comparativo de Tukey 5% .....         | 72 |
| Gráfico 8  | – | Absorção de água por capilaridade em 10 min e 90 min das argamassas produzidas com teste comparativo de Tukey 5% .....     | 73 |
| Gráfico 9  | – | Coefficiente de capilaridade das argamassas produzidas com teste comparativo de Tukey 5% .....                             | 74 |
| Gráfico 10 | – | Resistência à tração na flexão das argamassas produzidas com teste comparativo de Tukey 5% .....                           | 75 |
| Gráfico 11 | – | Resistência potencial de aderência à tração ao substrato das argamassas produzidas com teste comparativo de Tukey 5% ..... | 77 |
| Gráfico 12 | – | Resistência potencial de aderência à tração superficial das argamassas produzidas com teste comparativo de Tukey 5% .....  | 79 |
| Gráfico 13 | – | Condutividade térmica das argamassas produzidas com teste comparativo de Tukey 5% .....                                    | 82 |
| Gráfico 14 | – | Resistividade térmica das argamassas produzidas com teste comparativo de Tukey 5% .....                                    | 83 |
| Gráfico 15 | – | Capacidade calorífica volumétrica das argamassas produzidas com teste comparativo de Tukey 5% .....                        | 84 |
| Gráfico 16 | – | Difusividade térmica das argamassas produzidas com teste comparativo de Tukey 5% .....                                     | 85 |

## LISTA DE QUADROS

|          |   |                                                        |    |
|----------|---|--------------------------------------------------------|----|
| Quadro 1 | – | Classificações das argamassas .....                    | 20 |
| Quadro 2 | – | Traços 1:3 (em volume) encontrados na literatura ..... | 67 |

## LISTA DE TABELAS

|           |   |                                                                                                                                           |    |
|-----------|---|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1  | – | Propriedades físicas do resíduo de scheelita grosso e da areia quartzosa ....                                                             | 57 |
| Tabela 2  | – | Caracterização química do resíduo de scheelita grosso - FRX .....                                                                         | 59 |
| Tabela 3  | – | Caracterização química da areia quartzosa - FRX .....                                                                                     | 59 |
| Tabela 4  | – | Propriedades físicas do cimento Portland (CP II-F-32 RS) .....                                                                            | 62 |
| Tabela 5  | – | Tamanho das partículas do cimento Portland (CP II-F-32 RS) .....                                                                          | 62 |
| Tabela 6  | – | Erros entre as curvas teóricas e a curva ótima média .....                                                                                | 63 |
| Tabela 7  | – | Erros entre as curvas teóricas e experimentais .....                                                                                      | 64 |
| Tabela 8  | – | Propriedades físicas das misturas .....                                                                                                   | 64 |
| Tabela 9  | – | Traços básicos dos quatro tipos de argamassas de revestimento .....                                                                       | 66 |
| Tabela 10 | – | Valores da área entre as curvas de empacotamento ideal e real .....                                                                       | 69 |
| Tabela 11 | – | Relação água/materiais secos utilizada para cada tipo de argamassa .....                                                                  | 70 |
| Tabela 12 | – | Densidade de massa e teor de ar incorporado nas argamassas no estado fresco .....                                                         | 71 |
| Tabela 13 | – | Formas de ruptura e porcentagens de ocorrência das argamassas no ensaio de resistência potencial de aderência à tração ao substrato ..... | 78 |
| Tabela 14 | – | Formas de ruptura e porcentagens de ocorrência das argamassas no ensaio de resistência potencial de aderência à tração superficial .....  | 80 |
| Tabela 15 | – | Transmitância térmica e capacidade térmica de paredes externas .....                                                                      | 86 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|                               |                                                                            |
|-------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| ABNT                          | Associação Brasileira de Normas Técnicas                                   |
| $\text{Al}_2\text{O}_3$       | Óxido de alumínio                                                          |
| ANOVA                         | Análise de variância                                                       |
| AQ                            | Areia Quartzosa                                                            |
| ARP 1,18                      | Areia Quartzosa Retida na Peneira de 1,18 mm                               |
| ARP 2,36                      | Areia Quartzosa Retida na Peneira de 2,36 mm                               |
| C                             | Calcita                                                                    |
| CaO                           | Óxido de cálcio                                                            |
| $\text{CaWO}_4$               | Tungstato de cálcio                                                        |
| CME                           | Curvas das Misturas Experimentais                                          |
| CMT                           | Curvas das Misturas Teóricas                                               |
| Co                            | Coríndon                                                                   |
| COM                           | Curva Ótima Média                                                          |
| CP II-F-32 RS                 | Cimento Portland composto com material carbonático e resistente a sulfatos |
| CSAMA                         | Centro de Síntese e Análise de Materiais Avançados                         |
| CSW                           | Coarse Scheelite Waste                                                     |
| DE                            | Densidade de massa no estado endurecido                                    |
| DF                            | Densidade de massa no estado fresco                                        |
| DRX                           | Difratometria de Raios X                                                   |
| D10                           | Diâmetros a 10%                                                            |
| D50                           | Diâmetros a 50%                                                            |
| D90                           | Diâmetros a 90%                                                            |
| EDX                           | Espectrometria de Fluorescência de Raios X por Energia Dispersiva          |
| EFRX                          | Espectrômetro de Fluorescência de Raios X                                  |
| EVA                           | Etileno Acetato de Vinila                                                  |
| $\text{Fe}_2\text{O}_3$       | Óxido de ferro                                                             |
| $\text{FeWO}_4/\text{MnWO}_4$ | Tungstato de ferro-manganês                                                |
| FRX                           | Fluorescência de Raios X                                                   |
| GRG                           | Generalized Reduced Gradient                                               |
| IFRN                          | Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte |

|                  |                                                                                  |
|------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| ISO              | Organização Internacional de Normalização                                        |
| K <sub>2</sub> O | Óxido de potássio                                                                |
| LabCim           | Laboratório de Cimentos                                                          |
| LTC              | Laboratório de Transferência de Calor                                            |
| MEV              | Microscopia Eletrônica de Varredura                                              |
| MMQ              | Método dos Mínimos Quadrados                                                     |
| NBR              | Norma Brasileira                                                                 |
| PB               | Paraíba                                                                          |
| Q                | Quartzo                                                                          |
| QS               | Natural Quartz Sand                                                              |
| RDM              | Revestimento Decorativo Monocamada                                               |
| REF              | Referência                                                                       |
| RN               | Rio Grande do Norte                                                              |
| RSG              | Resíduo de Scheelita Grosso                                                      |
| SEDEC            | Secretaria do Desenvolvimento Econômico, da Ciência, da Tecnologia e da Inovação |
| SiO <sub>2</sub> | Dióxido de silício                                                               |
| SO <sub>3</sub>  | Trióxido de enxofre                                                              |
| SVVE             | Sistemas de Vedações Verticais Externas                                          |
| SVVIE            | Sistemas de Vedação Vertical Interno e Externo                                   |
| TFD              | Teor Fixo a ser Determinado                                                      |
| UERN             | Universidade do Estado do Rio Grande do Norte                                    |
| UFC              | Universidade Federal do Ceará                                                    |
| UFERSA           | Universidade Federal Rural do Semi-Árido                                         |
| UFRN             | Universidade Federal do Rio Grande do Norte                                      |
| W                | Wuestita                                                                         |
| Z7               | Zona bioclimática 7                                                              |
| Z8               | Zona bioclimática 8                                                              |

## SUMÁRIO

|            |                                                                                                                         |           |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b>   | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                                                                                 | <b>17</b> |
| <b>1.1</b> | <b>Objetivos da pesquisa .....</b>                                                                                      | <b>19</b> |
| 1.1.1      | Objetivo geral .....                                                                                                    | 19        |
| 1.1.2      | Objetivos específicos .....                                                                                             | 19        |
| <b>2</b>   | <b>REVISÃO DE LITERATURA .....</b>                                                                                      | <b>20</b> |
| <b>2.1</b> | <b>Argamassas .....</b>                                                                                                 | <b>20</b> |
| <b>2.2</b> | <b>Argamassas de revestimento .....</b>                                                                                 | <b>21</b> |
| 2.2.1      | Propriedades e características das argamassas de revestimento .....                                                     | 23        |
| 2.2.1.1    | Retenção de água .....                                                                                                  | 24        |
| 2.2.1.2    | Densidade de massa no estado fresco e no estado endurecido .....                                                        | 24        |
| 2.2.1.3    | Teor de ar incorporado .....                                                                                            | 25        |
| 2.2.1.4    | Tempo de uso .....                                                                                                      | 25        |
| 2.2.1.5    | Resistência à tração na flexão .....                                                                                    | 25        |
| 2.2.1.6    | Absorção de água por capilaridade .....                                                                                 | 25        |
| 2.2.1.7    | Difusão de vapor de água .....                                                                                          | 26        |
| 2.2.1.8    | Aderência .....                                                                                                         | 26        |
| 2.2.1.9    | Módulo de elasticidade dinâmico .....                                                                                   | 27        |
| 2.2.1.10   | Retração .....                                                                                                          | 27        |
| <b>2.3</b> | <b>Utilização de resíduos em argamassas .....</b>                                                                       | <b>28</b> |
| 2.3.1      | Argamassas de revestimento produzidas com resíduo de scheelita .....                                                    | 30        |
| <b>2.4</b> | <b>Scheelita .....</b>                                                                                                  | <b>32</b> |
| 2.4.1      | Mineração Tomaz Salustino S/A .....                                                                                     | 32        |
| 2.4.1.1    | Processo de beneficiamento da scheelita .....                                                                           | 33        |
| <b>2.5</b> | <b>Desempenho térmico de edificações .....</b>                                                                          | <b>37</b> |
| <b>3</b>   | <b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>                                                                                        | <b>40</b> |
| <b>3.1</b> | <b>Coleta, aquisição e beneficiamento dos materiais .....</b>                                                           | <b>41</b> |
| <b>3.2</b> | <b>Caracterização física dos materiais .....</b>                                                                        | <b>42</b> |
| <b>3.3</b> | <b>Caracterização microestrutural, química e mineralógica do resíduo de scheelita grosso e da areia quartzosa .....</b> | <b>44</b> |
| <b>3.4</b> | <b>Metodologia de dosagem .....</b>                                                                                     | <b>46</b> |
| 3.4.1      | Compatibilização granulométrica .....                                                                                   | 46        |

|             |                                                                                                 |           |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.4.2       | Definição do traço .....                                                                        | 47        |
| 3.4.3       | Análise de empacotamento das partículas .....                                                   | 48        |
| <b>3.5</b>  | <b>Produção das argamassas e moldagem dos corpos de prova .....</b>                             | <b>49</b> |
| <b>3.6</b>  | <b>Ensaio no estado fresco .....</b>                                                            | <b>49</b> |
| 3.6.1       | Determinação do índice de consistência .....                                                    | 49        |
| 3.6.2       | Densidade de massa no estado fresco e teor de ar incorporado .....                              | 50        |
| <b>3.7</b>  | <b>Ensaio no estado endurecido .....</b>                                                        | <b>50</b> |
| 3.7.1       | Densidade de massa aparente no estado endurecido .....                                          | 50        |
| 3.7.2       | Absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade .....                           | 51        |
| 3.7.3       | Resistência à tração na flexão .....                                                            | 52        |
| 3.7.4       | Resistência potencial de aderência à tração ao substrato e à tração superficial .....           | 52        |
| <b>3.8</b>  | <b>Ensaio térmico .....</b>                                                                     | <b>53</b> |
| 3.8.1       | Propriedades térmicas .....                                                                     | 53        |
| 3.8.2       | Desempenho térmico .....                                                                        | 55        |
| <b>3.9</b>  | <b>Análise estatística .....</b>                                                                | <b>55</b> |
| <b>4</b>    | <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>                                                             | <b>56</b> |
| <b>4.1</b>  | <b>Caracterização física do resíduo de scheelita grosso e da areia quartzosa .....</b>          | <b>56</b> |
| <b>4.2</b>  | <b>Caracterização microestrutural do resíduo de scheelita grosso e da areia quartzosa .....</b> | <b>58</b> |
| <b>4.3</b>  | <b>Caracterização química do resíduo de scheelita grosso e da areia quartzosa .....</b>         | <b>59</b> |
| <b>4.4</b>  | <b>Caracterização mineralógica do resíduo de scheelita grosso e da areia quartzosa .....</b>    | <b>60</b> |
| <b>4.5</b>  | <b>Caracterização física do cimento Portland .....</b>                                          | <b>61</b> |
| <b>4.6</b>  | <b>Compatibilização granulométrica .....</b>                                                    | <b>62</b> |
| <b>4.7</b>  | <b>Definição do traço .....</b>                                                                 | <b>66</b> |
| <b>4.8</b>  | <b>Análise do empacotamento das partículas .....</b>                                            | <b>68</b> |
| <b>4.9</b>  | <b>Caracterização das argamassas de revestimento no estado fresco .....</b>                     | <b>69</b> |
| 4.9.1       | Índice de consistência e quantidade de água .....                                               | 69        |
| 4.9.2       | Densidade de massa no estado fresco e teor de ar incorporado .....                              | 70        |
| <b>4.10</b> | <b>Caracterização das argamassas de revestimento no estado endurecido .</b>                     | <b>71</b> |

|             |                                                                              |           |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.10.1      | Densidade de massa aparente no estado endurecido .....                       | 71        |
| 4.10.2      | Absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade .....        | 73        |
| 4.10.3      | Resistência à tração na flexão .....                                         | 75        |
| 4.10.4      | Resistência potencial de aderência à tração ao substrato e superficial ..... | 76        |
| <b>4.11</b> | <b>Análise térmica das argamassas de revestimento .....</b>                  | <b>81</b> |
| 4.11.1      | Propriedades térmicas .....                                                  | 81        |
| 4.11.2      | Desempenho térmico .....                                                     | 85        |
| <b>5</b>    | <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>                                            | <b>87</b> |
|             | <b>REFERÊNCIAS .....</b>                                                     | <b>90</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

A construção civil é um dos setores que mais consome recursos naturais e gera uma quantidade significativa de resíduos nas construções e demolições. O que ocasiona diversos impactos ambientais negativos. Dentre esses recursos naturais destacam-se a água, a areia e a brita.

No ano de 2023 foi produzido no Brasil 654 milhões de toneladas de agregados, sendo 382 milhões de toneladas de areia e 272 milhões de toneladas de brita (Revista Areia e Brita, 2024).

O consumo mundial anual de areia e cascalho é de 50 bilhões de toneladas, sendo a areia considerada o segundo recurso natural mais explorado do planeta, perdendo apenas para a água. Ressalta-se que a extração de areia causa impactos na biodiversidade, em áreas de rios, podendo provocar erosões e diversos outros problemas ambientais (Nações Unidas, 2022).

Segundo Pastore (2022) uma das principais matérias-primas utilizadas na construção civil é a areia e um estudo da Leiden University, na Holanda, indicou que até 2060 a demanda mundial por areia pode aumentar em 45% podendo gerar uma escassez desse material. No entanto, o estudo propõe algumas soluções para evitar essa ocorrência, dentre elas um incentivo do governo e das autoridades de planejamento para a utilização de materiais alternativos à areia, como escória, brita, plástico reciclado e resíduos industriais (areia de fundição, cinzas volantes, cobre).

A utilização de materiais alternativos à areia natural contribui significativamente para reduzir os impactos ambientais negativos causados durante o processo de extração. Assim como, para reaproveitar os resíduos oriundos das indústrias mineradoras, que formam muitas vezes pilhas de resíduos nos seus pátios sem nenhuma utilidade, chegando a degradar o solo, o ar, as águas e até mesmo a comprometer a saúde humana.

As atividades de mineração, atualmente, têm como objetivo proporcionar uma harmonia entre a produção, a natureza e a sociedade, buscando interferir o mínimo no meio ambiente e na vida das pessoas. Com o intuito de possuir um compromisso com a sustentabilidade das operações (Instituto Brasileiro de Mineração, 2022).

A Mineração Tomaz Salustino S/A, mais conhecida como Mina Brejuí, localizada no município de Currais Novos, no estado do Rio Grande do Norte, é considerada a maior mina de minério de scheelita da América do Sul. A scheelita é um tungstato de cálcio ( $\text{CaWO}_4$ ) que

fornece tungstênio, um elemento com utilização nos mais diversos ramos industriais (Mineração Tomaz Salustino S/A, 2023).

As atividades mineradoras causam diversos impactos ambientais, na extração de scheelita os mesmos estão relacionados à flora, erosões no solo, ao ar com as detonações e britagem, poluição sonora, gases no processo de ustulação da pirita e as pilhas de resíduos alterando esteticamente a paisagem. A empresa está sempre buscando medidas que minimizem esses impactos (Mineração Tomaz Salustino S/A, 2023).

De acordo com Félix (2020) na Mina Brejuí há uma elevada produção de resíduos, são diariamente produzidos em torno de 50 m<sup>3</sup>, ao mês 1100 m<sup>3</sup> e ao ano 18000 m<sup>3</sup> aproximadamente. Estima-se uma acumulação em pilhas sobre o solo de 2,5 milhões de toneladas de resíduos do tipo fino e 4,5 milhões de toneladas do tipo grosso.

Com o intuito de proporcionar um destino adequado aos resíduos gerados no processo da mineração de scheelita do semiárido potiguar e de minimizar a utilização da areia natural como agregado miúdo na confecção de argamassa, foram produzidas argamassas de revestimento com incorporação do resíduo da scheelita grosso substituindo de forma parcial e total a areia quartzosa natural. Buscando viabilizar um traço de produção convencional para essas argamassas alternativas e caracterizá-las por meio de ensaios no estado fresco e endurecido, verificando se apresentam propriedades físicas, mecânicas e térmicas adequadas para ser utilizadas como argamassa de revestimento.

É interessante salientar que analisar as propriedades térmicas das argamassas de revestimento é bastante relevante, principalmente em regiões semiáridas, por interferir no conforto térmico da edificação. Ambientes confortáveis termicamente apresentam inúmeras vantagens, dentre elas, bem-estar aos ocupantes e economia de energia.

A utilização dessas argamassas de revestimento alternativas contribuirá oferecendo um destino e uso adequado ao resíduo da mineração da scheelita, reduzindo os impactos ambientais causados ao serem diariamente acumulados sobre o solo. Assim como, irá reduzir o consumo da areia quartzosa natural nas construções, um fator que causa degradação ambiental durante o processo de extração. São medidas que buscam a sustentabilidade nas indústrias de mineração da scheelita e da construção civil, contribuindo significativamente para a preservação do meio ambiente.

## **1.1 Objetivos da pesquisa**

### **1.1.1 Objetivo geral**

Viabilizar um traço de argamassa de revestimento incorporada do resíduo de scheelita compatível para produção convencional.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

- Verificar o efeito do resíduo da scheelita na capacidade de aderência da argamassa de revestimento.
- Avaliar o desempenho térmico mínimo de sistemas de vedações verticais externas revestidas com argamassas incorporadas do resíduo de scheelita grosso em ambientes de permanência prolongada de unidade habitacional.
- Contribuir para o melhoramento do ciclo de vida das indústrias de mineração da scheelita e da construção civil.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Argamassas

As argamassas são fundamentais e de grande utilização na construção civil. Conforme a ABNT NBR 13281-1 (2023) argamassa inorgânica é uma mistura homogênea de agregados miúdos, um ou mais ligantes inorgânicos e água, podendo também conter fibras, adições e/ou aditivos, apresentando características específicas de desempenho adequadas à utilização.

Os materiais que geralmente constituem as argamassas são a areia de origem em rios, cavas ou processos de britagem (agregado miúdo), cal hidratada e/ou o cimento Portland (ligantes inorgânicos), água potável, aditivos e adições minerais que influenciam nas propriedades (Goto; Ribeiro; Centofante, 2018).

Sendo utilizadas principalmente em revestimento de paredes, assentamento de alvenarias, contrapisos, assentamento e rejuntamento de revestimentos cerâmicos e pedra (Carasek, 2017).

As argamassas podem ser classificadas de acordo com diversos critérios, sendo alguns deles: natureza, tipo e número de ligante; consistência e plasticidade da argamassa; densidade de massa da argamassa; forma de preparo ou fornecimento (Carasek, 2017). O Quadro 1 apresenta essas classificações.

Quadro 1 – Classificações das argamassas

| <b>Critério de classificação</b> | <b>Tipo</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Quanto à natureza do ligante     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Argamassa aérea</li> <li>• Argamassa hidráulica</li> <li>• Argamassa polimérica</li> </ul>                                                                                                                                                              |
| Quanto ao tipo de ligante        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Argamassa de cal</li> <li>• Argamassa de cimento</li> <li>• Argamassa de cimento e cal</li> <li>• Argamassa de gesso</li> <li>• Argamassa de cal e gesso</li> <li>• Argamassa constituída de resinas (acrílica, SBR, epóxi, poliéster, etc.)</li> </ul> |

(continua)

(continuação)

| <b>Critério de classificação</b>          | <b>Tipo</b>                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|-------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Quanto ao número de ligante               | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Argamassa simples</li> <li>• Argamassa mista</li> </ul>                                                                                                                                                                                         |
| Quanto à consistência da argamassa        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Argamassa seca</li> <li>• Argamassa plástica</li> <li>• Argamassa fluída</li> </ul>                                                                                                                                                             |
| Quanto à plasticidade da argamassa        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Argamassa pobre ou magra</li> <li>• Argamassa média ou cheia</li> <li>• Argamassa rica ou gorda</li> </ul>                                                                                                                                      |
| Quanto à densidade de massa da argamassa  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Argamassa leve</li> <li>• Argamassa normal</li> <li>• Argamassa pesada</li> </ul>                                                                                                                                                               |
| Quanto à forma de preparo ou fornecimento | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Argamassa preparada em obra</li> <li>• Mistura semipronta para argamassa</li> <li>• Argamassa industrializada<br/>(fornecidas ensacadas ou em silos)</li> <li>• Argamassa dosada em central<br/>(inclui-se a argamassa estabilizada)</li> </ul> |

Fonte: Carasek (2017, p. 924).

## 2.2 Argamassas de revestimento

Dentre os diversos tipos de revestimentos existentes os mais comuns e tradicionais são os de argamassas, usados para revestir paredes, muros e tetos, os quais muitas vezes recebem acabamentos decorativos como pinturas, laminados, revestimentos cerâmicos e diversos outros, atualmente, disponíveis no mercado (Lisboa; Alves; Melo, 2017; Salgado, 2018).

As argamassas para revestimento de paredes e tetos são definidas, como: argamassa inorgânica para revestimento interno e argamassa inorgânica para revestimento externo. Argamassa inorgânica para revestimento interno é recomendada para revestir paredes internas e tetos da edificação, e a argamassa inorgânica para revestimento externo é indicada para o revestimento dos elementos da edificação em contato com o meio externo, como: muros, fachadas, paredes e entre outros, ambas caracterizando-se como camada de regularização (emboço, reboco e camada única), possuindo características específicas de desempenho

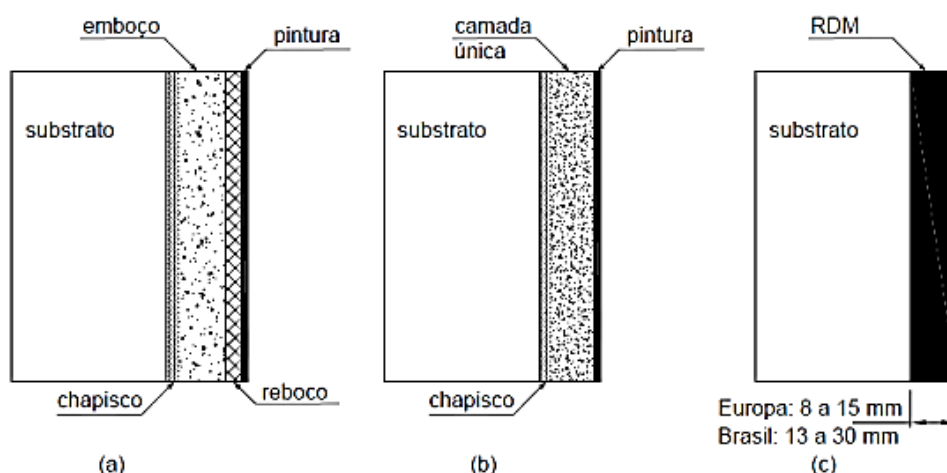
adequadas ao uso como substrato para assentamento ou aplicação do acabamento decorativo (ABNT, 2023).

O revestimento de argamassa pode ser constituído por uma única ou mais camadas superpostas de argamassa. Quanto ao número de camadas define-se em revestimento de camada única e revestimento de duas camadas. O revestimento de camada única é composto por um único tipo de argamassa (com exceção do chapisco), aplicado sobre a base, por meio de uma ou mais demãos (ABNT, 2013). Segundo Carasek (2017) é o tipo de revestimento atualmente mais utilizado no Brasil, denominado popularmente por “massa única” ou “reboco paulista.” O revestimento de duas camadas refere-se ao revestimento formado por dois tipos de argamassa (exceto o chapisco), sendo aplicados à base, também em uma ou mais demãos (ABNT, 2013).

Chapisco é uma camada utilizada para preparar a base, com o intuito de melhorar as condições de aderência do revestimento e uniformizar a superfície quanto à absorção, sendo aplicada de forma contínua ou descontínua. Emboço é uma camada de revestimento que tem a função de cobrir e regularizar a superfície da base ou o chapisco, possibilitando uma superfície capaz de receber outra camada, seja de reboco ou de revestimento decorativo, ou podendo também constituir-se no acabamento final. Reboco é uma camada de revestimento aplicada para cobrir o emboço, criando uma superfície propícia a receber o revestimento decorativo ou constitui-se no acabamento final (ABNT, 2013). A Figura 1 ilustra a aplicação dessas camadas em uma superfície.

Vem sendo empregado também o revestimento técnico decorativo monocamada ou monocapa (RDM), ao qual é aplicado em uma única camada, como mostra a Figura 1, desempenhando, simultaneamente, as funções de proteção, regularização e decoração. É um tipo de argamassa industrializada bastante usada em revestimento de fachadas de alvenaria estrutural (Carasek, 2017).

Figura 1 – Revestimentos de parede: emboço + reboco + pintura (a); camada única + pintura (b); revestimento decorativo monocamada (RDM) (c)



Fonte: Carasek (2017, p. 928).

Os revestimentos de argamassas de parede desempenham diversas funções, dentre elas, pode-se destacar como principais: em revestimentos externos, protegem a alvenaria e a estrutura da ação do intemperismo; compõem o sistema de vedação dos edifícios, colaborando com o isolamento térmico e acústico, estanqueidade à água, segurança ao fogo, resistência ao desgaste e abalos superficiais; contribuem para a estética da edificação, regularizando a superfície dos elementos de vedação e servindo como base para a aplicação de acabamentos decorativos (Carasek, 2017).

Portanto, as argamassas de revestimento são consideradas um componente fundamental da construção civil, pois auxiliam no aumento da durabilidade e na redução dos custos de manutenção das edificações (Goto; Ribeiro; Centofante, 2018).

### 2.2.1 Propriedades e características das argamassas de revestimento

A ABNT NBR 13281-1 (2023) Argamassas inorgânicas – Requisitos e métodos de ensaios - Parte 1: Argamassas para revestimento de paredes e tetos, estabelece os requisitos informativos e classificatórios que as argamassas inorgânicas para revestimento devem atender no estado fresco e endurecido, independentemente da forma de produção (industrializadas, produzidas em canteiro de obras, estabilizadas, usinadas, prontas para uso, etc.) e aplicação (manual ou mecanizada).

Os requisitos informativos das argamassas de revestimento no estado fresco são: retenção de água, densidade de massa no estado fresco, teor de ar incorporado e tempo de uso. E no estado endurecido: resistência à tração na flexão, densidade de massa no estado endurecido, coeficiente de absorção de água por capilaridade e o fator de resistência à difusão de vapor de água (ABNT, 2023).

São considerados requisitos que classificam as argamassas de revestimento a resistência potencial de aderência à tração ao substrato, resistência potencial à tração superficial, módulo de elasticidade dinâmico e variação dimensional (retração ou expansão linear) (ABNT, 2023).

#### 2.2.1.1 Retenção de água

Propriedade relacionada à capacidade da argamassa em estado fresco manter a sua trabalhabilidade mesmo estando sujeita a situações que provoquem a perda de água de amassamento, como evaporação e absorção de água da base (Carasek, 2017).

Além de intervir no comportamento da argamassa fresca, no processo de acabamento e retração plástica, também interfere nas propriedades da argamassa no estado endurecido, dentre elas: resistência mecânica final, aderência e durabilidade. Depois de endurecidas, as argamassas necessitam de uma apropriada retenção de água para que as reações químicas de endurecimento dos ligantes ocorram de forma adequada. Ressalta-se que a retenção de água se altera em função da composição da argamassa (Carasek, 2017).

#### 2.2.1.2 Densidade de massa no estado fresco e no estado endurecido

A densidade de massa é a relação entre a massa e o volume da argamassa. A qual varia de acordo com o teor de ar presente na argamassa e a massa específica dos materiais utilizados em sua constituição, principalmente do agregado (Carasek, 2017).

Argamassas mais leves podem proporcionar um aumento de produtividade, tendo em vista que o operário despenderá um menor esforço para a sua aplicação. Em relação, a densidade de massa no estado endurecido, observa-se que o valor é um pouco menor do que o da densidade de massa no estado fresco, em razão da saída de parte da água que constitui a argamassa de revestimento. Nota-se que há uma relação direta entre o teor de água presente na argamassa e a redução da densidade de massa com o processo de secagem (Carasek, 2017).

### 2.2.1.3 Teor de ar incorporado

O teor de ar incorporado interfere nas propriedades da argamassa no estado fresco e endurecido. De acordo com Medeiros *et al.* (2019) as argamassas com alto teor de ar incorporado apresentam uma boa trabalhabilidade, porém esse valor elevado pode afetar a resistência mecânica. No mercado há aditivos que são utilizados com o intuito de aumentar o teor de ar incorporado das argamassas.

### 2.2.1.4 Tempo de uso

Define-se como tempo de uso o intervalo de tempo máximo transcorrido entre a mistura da argamassa de revestimento e a sua aplicação, de forma que não ocorram alterações em suas propriedades no estado fresco e garanta o desempenho das propriedades no estado endurecido (ABNT, 2023).

### 2.2.1.5 Resistência à tração na flexão

As argamassas de revestimentos de paredes e tetos apresentam esforços de tração gerados pelas movimentações oriundas das variações de umidade, térmicas e pela retração (Mattana *et al.*, 2012).

Em revestimento de argamassa, a maior solicitação é de tração ou cisalhamento, devido esse tipo de argamassa ter que suportar os esforços de tensões para evitar fissurações ao longo do revestimento. Sendo as argamassas de revestimento mais associadas à resistência à tração na flexão do que a resistência à compressão (Freitas, 2010).

Na maioria das vezes, as argamassas para revestimento que possuem uma baixa resistência à tração na flexão, não resistem aos esforços de tensões, ocasionando assim manifestações patológicas, por exemplo, fissurações (Freitas, 2010).

### 2.2.1.6 Absorção de água por capilaridade

A absorção de água por capilaridade é uma propriedade que influencia na durabilidade e no desempenho das argamassas. A absorção de água por capilaridade em uma argamassa está relacionada à quantidade, ao diâmetro e a conexão dos poros capilares. Ou seja, quanto

mais conectados forem os poros capilares e a depender também do diâmetro e da quantidade, ocorrerá uma maior absorção de água (Mattana *et al.*, 2012).

Segundo a ABNT NBR 13281-1 (2023), os requisitos exigidos para o coeficiente de absorção de água por capilaridade das argamassas inorgânicas para revestimento dependem de diversos parâmetros: local de utilização se é interno ou externo; acabamento a ser empregado; condições higrotérmicas, como temperatura, precipitação, umidade relativa, velocidade do vento, etc.; região geográfica onde serão aplicadas; altura e entorno da edificação; face de uso.

#### 2.2.1.7 Difusão de vapor de água

O vapor de água é conduzido por meio dos poros presentes nos materiais de construção. A difusão acontece através do movimento do vapor de água de uma região de elevada pressão de vapor para uma região de baixa pressão de vapor (Mukhopadhyaya *et al.*, 2011).

O fator de resistência ao vapor de água é obtido por meio da divisão da permeabilidade ao vapor de água do ar pela permeabilidade ao vapor de água do material em questão, ou seja, da argamassa de revestimento analisada. Ressalta-se que quanto maior for esse fator menos permeável ao vapor de água será a argamassa analisada (Azevedo, 2015).

#### 2.2.1.8 Aderência

A aderência é considerada uma propriedade fundamental do revestimento de argamassa em seu estado endurecido, sem ela esse tipo de revestimento não atenderia a nenhuma de suas funções. É a propriedade que possibilita ao revestimento argamassado absorver as tensões normais ou tangenciais na superfície de interface com o substrato (Carasek, 2017).

É utilizado o termo aderência com o intuito de descrever a resistência e a extensão do contato entre a argamassa e uma base ou substrato. Trata-se de uma propriedade que depende da interação entre a argamassa e o substrato, portanto, não se pode falar em aderência sem indicar em que material a argamassa está sendo aplicada (Carasek, 2017).

De forma didática, pode-se considerar que a aderência é derivada da combinação das seguintes propriedades da interface argamassa-substrato: resistência de aderência à tração, resistência de aderência ao cisalhamento e a extensão de aderência (razão entre a área de contato efetivo e a área total possível de ser unida) (Carasek, 2017).

Diversos fatores influenciam na aderência, dentre eles: trabalhabilidade ou reologia da argamassa; processo de execução; proporção e natureza dos materiais constituintes das argamassas; características do substrato (absorção de água, rugosidade e porosidade); limpeza e tratamentos superficiais do substrato (chapisco); mão de obra e as condições climáticas durante o processo de aplicação (Carasek, 2017).

#### 2.2.1.9 Módulo de elasticidade dinâmico

Uma característica bastante importante para as argamassas de revestimento é a capacidade que elas devem apresentar de absorver pequenas deformações, para que possam se deformar sem ocasionar rupturas ou através de microfissuras, de forma que não comprometa a sua aderência ao substrato, estanqueidade e durabilidade. Trata-se de uma propriedade complexa, que está relacionada tanto ao módulo de elasticidade como a resistência mecânica que a argamassa possui, sendo capaz de influenciar na fissuração e aderência dos revestimentos (Carasek, 2017).

Define-se o módulo de elasticidade como uma propriedade que representa a rigidez da argamassa no estado endurecido. As argamassas que apresentam uma maior rigidez possuem uma menor capacidade de se deformar antes de ocorrer a ruptura. Portanto, as argamassas de revestimento não podem possuir um módulo de elasticidade muito alto, pois resultam em elementos bastante rígidos que não são capazes de propiciar a deformação necessária a esse tipo de material (Haddad *et al.*, 2020).

#### 2.2.1.10 Retração

A variação dimensional nas argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos ocorre por retração ou expansão linear. Segundo Carasek (2017) como resultado de um mecanismo complexo, associado com a variação de volume da pasta aglomerante, tem-se a retração, um fenômeno que apresenta papel fundamental no desempenho das argamassas aplicadas, principalmente em relação à durabilidade e à estanqueidade.

Diversos fatores influenciam na retração das argamassas, como: granulometria da areia, pois ela é capaz de estabelecer o volume de vazios que necessita ser preenchido pela pasta aglomerante; teores de finos totais (grãos com tamanho inferior a 0,075 mm) e de água presentes nas argamassas. Quanto maior for a espessura da argamassa de revestimento, maior a retração ocorrida (Carasek, 2017).

### 2.3 Utilização de resíduos em argamassas

O crescimento populacional proporcionou o desenvolvimento urbano e do setor industrial. Assim como, o aumento da poluição e da quantidade de resíduos gerados e o consumo de recursos naturais. Sendo a indústria da argamassa e do concreto as que mais consomem recursos naturais, tendo como os de maior impacto a água, a areia e os agregados graúdos (Lisboa; Alves; Melo, 2017). Em uma construção, os agregados são considerados os materiais mais usados, correspondendo a quase todo o estoque de material presente nas obras de infraestrutura e nas edificações (Bauer, 2019).

Diante da preocupação com os recursos naturais que são finitos e com a qualidade do meio ambiente que apresenta limitações para se regenerar, governos, meio político, ambientalistas, cientistas e academias vêm se mobilizando com o intuito de procurar soluções sustentáveis para as atividades humanas de produção e consumo (Bauer, 2019).

Adotar a sustentabilidade no setor da construção civil constitui em desenvolver produtos apropriados aos usos em que serão impostos. Sendo capazes de propiciar ao ser humano um ambiente confortável, saudável, confiável, seguro e durável, de forma, que atendam às necessidades e anseios da sociedade em relação à qualidade de vida. No decorrer do uso, esses produtos devem oferecer economia de gastos e facilidade de manutenção. A sua vida deve ser prolongada e também é necessário prever a possibilidade de reusar os materiais e componentes e qual a destinação correta ao chegar ao término de sua serventia (Takaoka, 2013).

A utilização de resíduos como matéria-prima pode colaborar na mitigação dos impactos ambientais e na redução do consumo de matérias-primas naturais e de energéticos (Bauer, 2019). Os resíduos provenientes de processos industriais estão sendo bastante estudados para utilização na construção civil nas mais diversas aplicabilidades, dentre elas destaca-se como elementos constituintes de argamassas, substituindo o agregado miúdo convencional, ou seja, a areia quartzosa natural, e até mesmo parcialmente o cimento Portland e a cal. Como pode ser visto nos trabalhos de vários pesquisadores.

Pesquisas analisaram a viabilidade da utilização de resíduos provenientes da fabricação de porcelanato, piso cerâmico e azulejo em argamassas. Os resíduos substituíram 100% a areia com traço de 1:3 em massa. Obteve-se como resultados para as argamassas com incorporação do porcelanato e do piso cerâmico um bom desempenho mecânico à tração e à compressão, assim como a entrada de agentes agressivos. Apresentando um grande potencial de utilização (Paixão *et al.*, 2011).

O artigo de revisão sistemática da literatura de Macedo *et al.* (2021) constatou que a maioria das pesquisas relacionadas as argamassas com incorporação de resíduos de britagem de rocha, ou seja, o pó de pedra, concentram-se nas regiões Sul e Sudeste, e que a utilização desse resíduo apresenta melhorias nas propriedades mecânicas e físicas dessas argamassas. A principal limitação está relacionada a trabalhabilidade, devido a elevada quantidade de finos e a morfologia dos grãos, por ser angulosos, irregulares e lamelares.

Farias Filho *et al.* (2011) estudaram a durabilidade das argamassas convencionais e alternativas incorporadas com resíduos da serragem do granito e da construção civil. Realizaram ensaios de envelhecimento natural e acelerado, utilizando percentagens de substituição, em massa, da cal por resíduo de 30% e 50%. Obtiveram como resultado para o envelhecimento natural um comprometimento da durabilidade após 60 dias, reduzindo o comportamento mecânico e os corpos de prova de resíduo de construção foram os que obtiveram melhores resultados. Em relação ao envelhecimento acelerado não foi observado comprometimento na durabilidade e sim a formação de potássio e silicoaluminatos de cálcio favorecendo um aumento no comportamento mecânico do material.

As propriedades mecânicas e térmicas foram analisadas em uma argamassa de revestimento fabricada com rejeito de minério de ferro substituindo parcialmente o cimento Portland, nas porcentagens de 0%, 10% e 20%. Realizados todos os ensaios concluíram que as argamassas com incorporação do rejeito de minério de ferro apresentam condutividade térmica semelhante às argamassas de referência. Não foram identificadas alterações no comportamento mecânico (Moraes *et al.*, 2020).

Silva *et al.* (2019) realizaram uma pesquisa com os resíduos de quartzito e scheelita com o intuito de comparar e analisar se as suas propriedades físicas, químicas e mineralógicas são viáveis para que sejam usados em argamassas de revestimento. As propriedades físicas apresentadas indicam que podem ser incorporados nas argamassas. Enquanto na caracterização química foi verificado que é necessário estudar a reatividade em meios agressivos.

Argamassas foram produzidas por meio da combinação do resíduo de scheelita grosso e fino substituindo a areia natural, em traços de 1:3 e 1:1:6 em volume. Ao analisar as propriedades de consistência, densidade aparente no estado fresco e endurecido, resistência à tração na flexão e à compressão, concluiu-se que as argamassas com incorporação dos resíduos reduziram o consumo de água para um mesmo índice de consistência, apresentaram maior densidade e resistência à tração e à compressão (Souza *et al.*, 2023).

### 2.3.1 Argamassas de revestimento produzidas com resíduo de scheelita

A scheelita fornece tungstênio, um mineral metálico de grande aplicação nos mais diversos ramos industriais, dentre eles: na indústria mecânica, eletrônica e petrolífera. Por ser amplamente consumido, a extração da scheelita gera bastante resíduo nas mineradoras.

Atualmente, já existem pesquisas, embora escassas, voltadas a aplicação desse resíduo na produção de argamassas de revestimento, com o intuito de proporcionar uma destinação adequada para evitar pilhas de resíduos sobre o solo causando impactos ambientais, proporcionar lucro para as empresas de mineração e também reduzir o consumo de areia quartzosa natural que ocasiona degradações durante o processo de extração.

Macedo *et al.* (2021) elaboraram um artigo com o objetivo de reunir e analisar as pesquisas e publicações referentes as argamassas produzidas com resíduo de scheelita. Os autores observaram que a maioria das pesquisas relacionadas a esse tipo de argamassa são desenvolvidas nos estados da Paraíba (PB) e Rio Grande do Norte (RN) por concentrar as maiores reservas de scheelita do Brasil. Os estudos mostraram que a utilização do resíduo de scheelita em substituição ao agregado, ou seja, a areia natural, apresenta melhorias nas propriedades mecânicas e físicas das argamassas, principalmente quando é levado em consideração um bom ajuste granulométrico para obter um melhor empacotamento das partículas. Quanto às limitações encontradas está o baixo teor de ar incorporado e uma elevada densidade de massa, o que compromete a trabalhabilidade.

Pesquisadores produziram argamassas de revestimento e assentamento utilizando resíduo de scheelita como substituto de parte do agregado miúdo, ou seja, da areia. Com o intuito de caracterizar o resíduo e analisar as propriedades das argamassas, três traços foram confeccionados, um sendo de referência com 100% de areia e os outros dois com incorporação de 20% e 40% de resíduo de scheelita. O resíduo apresentou natureza cristalina, granulometria arredondada e uniforme. Sendo constatado que possui granulometria adequada a utilização como agregado miúdo, ou seja, apresenta possibilidade de ser utilizado na produção de argamassas nas regiões onde são produzidos (Queiroz Neto *et al.*, 2016).

Ensaio de granulometria a laser, densidade aparente e relativa, EDX, DRX, MEV, análise térmica do resíduo, resistência de aderência à tração, resistência à compressão e de absorção de água, foram realizados no resíduo de scheelita e em argamassas de revestimento com 100% de substituição da areia natural pelo resíduo da scheelita, considerando os traços em volume de 1:2:8, 1:2:9 e 1:2:10 (cimento:hidróxido de cálcio:agregado miúdo). Concluiu-se que o resíduo possui características físicas e químicas semelhantes às da areia e as

propriedades mecânicas das argamassas estão em conformidade com as normas que regem as argamassas de revestimento, podendo o resíduo ser utilizado como agregado miúdo na produção de argamassas de revestimento (Medeiros *et al.*, 2019).

O tipo e o tempo de cura influenciam na resistência à compressão simples das argamassas. Com isso, analisou-se o comportamento mecânico em relação à cura úmida e a cura imersa de argamassas de revestimento confeccionadas com substituição total do agregado convencional pelo resíduo da mineração da scheelita. Foram fabricados corpos de prova com traços de 1:1:6 e 1:3, ambos em massa. Em 28 dias, o melhor tipo de cura para as argamassas com resíduo de scheelita foi a úmida, levando-se em consideração a resistência à compressão simples, pois apresentou resultados satisfatórios (Souza *et al.*, 2019).

A reação de agregados alcalinos é um processo químico importante a ser estudado, pois forma um gel alcalino altamente expansivo capaz de causar rachaduras e microfissuras nas argamassas. A pesquisa teve como objetivo investigar a viabilidade e a resistência a reação álcali-agregado de uma argamassa de revestimento produzida com rejeito de scheelita substituindo totalmente a areia natural. Obteve-se como resultados: os resíduos da scheelita apresentam características físicas e químicas similares às da areia; após os ciclos de molhagem e secagem os testes de durabilidade não demonstraram alterações no desempenho mecânico da argamassa; não foi constatado formação de gel alcalino nos poros e fissuras da argamassa; a substituição da areia natural pelo rejeito da scheelita na argamassa de revestimento é satisfatória de acordo com os testes mecânicos (Medeiros *et al.*, 2021).

Verificou-se o desempenho de argamassas de revestimento confeccionadas substituindo totalmente o agregado natural por areias binárias residuais de scheelita e pó de pedra. Sendo produzidas na proporção de 1:3 (volume). Obteve-se uma argamassa mais densa no estado fresco, com uma melhor consistência, maior retenção de água e teor de ar incorporado similar a argamassa de referência. Quanto ao estado endurecido, apresentou elevada resistência mecânica, maior densidade de massa, menor absorção por imersão e por capilaridade, resistência de aderência à tração próxima da argamassa de referência e superior aos valores mínimos determinados pelas normas brasileiras. Mostrando-se viável o uso da composição de areia residual de scheelita e pó de pedra como agregado para argamassas (Macedo, 2021).

Medeiros (2016) desenvolveu uma pesquisa com o intuito de analisar a utilização do resíduo de scheelita em substituição a areia na produção de argamassas de revestimento. Foram confeccionados traços de 1:1:6 (volume) e 1:3 (volume), substituindo a areia pelo resíduo de scheelita grosso em percentuais de 0%, 25%, 50%, 75% e 100%. Analisando-as

por meio de ensaios no estado fresco (consistência, densidade de massa, retenção de água, teor de ar incorporado) e no estado endurecido (resistência à compressão e à tração na flexão, densidade de massa, absorção de água por imersão e por capilaridade, módulo de elasticidade dinâmico). Diante destes ensaios executados, concluiu-se que é adequado o resíduo de scheelita ser utilizado na produção de argamassas de revestimento convencionais.

## 2.4 Scheelita

No Brasil os minérios que contêm tungstênio são a scheelita que é tungstato de cálcio ( $\text{CaWO}_4$ ) e a wolframita um tungstato de ferro-manganês ( $\text{FeWO}_4/\text{MnWO}_4$ ). Os estados do Rio Grande do Norte e da Paraíba possuem os principais depósitos de scheelita do país. Outros estados, como Ceará, Pernambuco, Alagoas, Minas Gerais e São Paulo também apresentam depósitos, mas sendo de menor importância (Silva, 2018).

O Rio Grande do Norte produz diversas substâncias minerais, ao qual é considerado o maior produtor nacional de scheelita e sal marinho. Sendo a Região do Seridó caracterizada pelas minerações de scheelita, calcário, feldspato, ouro, caulim, tantalita-columbita, rochas ornamentais e gemas (turmalina, água-marinha) (Rio Grande do Norte, 2021).

O tungstênio é um metal fundamental para as mais diversas indústrias. Apresenta como características um alto ponto de fusão, dureza, resistência à tração, resistência ao ataque de ácidos, bases e oxigênio, alta densidade e baixa volatilidade. Com isso, é utilizado na produção de catalisadores, lubrificantes, filamentos para lâmpadas, eletrodos (velas de ignição), tubos de raios X, brocas, serras de metais, ligas metálicas resistentes a corrosão e temperaturas extremas, armamento e componentes aeroespaciais (Silva, 2018).

### 2.4.1 Mineração Tomaz Salustino S/A

A Mineração Tomaz Salustino S/A, mais conhecida como Mina Brejuí, está localizada no município de Currais Novos, no estado do Rio Grande do Norte. Considerada um dos maiores ativos minerais do Brasil e a maior mina de scheelita da América do Sul. Suas atividades iniciaram em 1943. Ressalta-se que a mineração em Currais Novos alcançou seu apogeu na Segunda Guerra Mundial, onde fornecia toneladas de minérios às indústrias do aço (Mineração Tomaz Salustino S/A, 2023).

Por volta dos anos 80, deu início a um declínio na mineração devido à oscilação dos preços internacionais da scheelita e por outros minérios estarem sendo utilizados na

fabricação de elementos tecnológicos e industriais, o que ocasionou uma redução nas atividades de extração mineral da Mina Brejuí e a busca por novas alternativas econômicas. No final da década de 90, houve uma paralisação parcial das atividades minerais no município de Currais Novos, porém essas atividades estão voltando a ser realizadas. A Mina Brejuí, além de ter retomado suas atividades minerais, tornou-se o maior parque temático do Rio Grande do Norte (Mineração Tomaz Salustino S/A, 2023).

A Mineração Tomaz Salustino é uma empresa que contribuiu para o progresso da cidade de Currais Novos. Proporciona geração de emprego e colabora para o desenvolvimento econômico, social e humano da região do Seridó (Mineração Tomaz Salustino S/A, 2023).

Na Mina Brejuí ocorre apenas o processo de extração da scheelita e a sua venda. Sendo os seus compradores responsáveis pela extração do tungstênio. Ou seja, na mina não é realizado o processo de beneficiamento do tungstênio, porque é uma atividade bastante onerosa (Souza, 2019).

As atividades de mineração geram impactos ambientais, durante o processo de extração de scheelita os fatores ambientais mais afetados são o solo (erosões), o ar (detonações e britagem), a flora (abertura de acessos e picadas), a paisagem (alterações estéticas devido às dunas de rejeitos), gera gases (ustulação da pirita) e poluição sonora (marteleiros pneumáticos). O Grupo Tomaz Salustino é consciente desses impactos provocados e busca minimizá-los (Mineração Tomaz Salustino S/A, 2023).

#### 2.4.1.1 Processo de beneficiamento da scheelita

No interior da mina ocorre a fragmentação das rochas por meio de detonações com explosivos (Figura 2), as quais são levadas e depositadas em uma grelha que permite apenas a passagem dos fragmentos com dimensões apropriadas para o britador, ou seja, que não o danifique, como mostra a Figura 3. Os fragmentos de rochas retidos na grelha são quebrados manualmente com auxílio de marteleiros para permitir a passagem (Ramos Filho, 2021).

Figura 2 – Rochas fragmentadas no interior da mina



Fonte: Arquivos da autora (2022).

Figura 3 – Grelha



Fonte: Arquivos da autora (2022).

Após as rochas serem britadas, passam por processos de peneiramento, moagem e gravimetria para chegar às mesas vibratórias, onde a scheelita é separada dos resíduos por densidade (Ramos Filho, 2021).

Três tipos de materiais são separados nas mesas vibratórias: granulado, misto e resíduo. Granulado é a scheelita. O misto é um material que ainda será reaproveitado, por ser formado pela mistura de scheelita com resíduos do beneficiamento. E o resíduo, chamado também de resíduo grosso, são partículas de granulometria arenosa, que será descartado (Ramos Filho, 2021). A Figura 4 apresenta o processo de separação desses três materiais em uma das mesas vibratórias. E a Figura 5 o resíduo grosso descartado ao ar livre no pátio da mineradora.

Figura 4 – Separação do granulado, misto e resíduo na mesa vibratória



Fonte: Arquivos da autora (2022).

Figura 5 – Dunas de resíduo grosso da scheelita



Fonte: Arquivos da autora (2022).

O misto passa por processos de recolhimento e transporte até o helicóndeo (depósito em forma de cone) sendo em seguida transportado a outras mesas de concentração, ou seja, mesas de retorno. Não sendo mais possível retirar partículas de scheelita do misto, ele é conduzido ao classificador onde ocorre a separação das partículas finas e da água das partículas grossas existentes nele. A lama mais úmida é transportada a um reservatório com o intuito de melhorar a turbidez da água e assim ser reaproveitada em processos posteriores. A lama mais seca é conduzida por tubulações até o pátio da mina onde é depositada ao ar livre (Figura 6), e ao secar constitui o resíduo fino do beneficiamento de scheelita (Ramos Filho, 2021).

Figura 6 – Lama seca depositada ao ar livre



Fonte: Arquivos da autora (2022).

A scheelita pura passa por procedimento de secagem ao sol, sendo posteriormente queimada em fornos com o intuito de eliminar as impurezas e em seguida é conduzida a eletroímã para separar os elementos magnéticos, por exemplo, o ferro. Por fim, é ensacada, pesada e armazenada para a comercialização (Ramos Filho, 2021).

Vale ressaltar que o processo de beneficiamento da scheelita na Mina Brejuí ocorre pelo princípio da gravidade, pois a densidade da scheelita é maior do que a densidade dos outros minérios associados nas rochas. Não havendo a utilização de reagentes para procedimentos de separações químicas com o propósito de beneficiar o tungstênio presente na scheelita coletada, o que seria algo mais oneroso (Ramos Filho, 2021).

## 2.5 Desempenho térmico de edificações

O desempenho térmico em uma edificação é influenciado por diversos fatores, entre eles: condições de exposição à insolação e à ventilação, ganhos de calor proveniente das superfícies externas como paredes e coberturas e também das aberturas existentes e superfícies envidraçadas. Com isso, os projetistas têm a função de conhecer as propriedades térmicas dos materiais e elementos construtivos que serão utilizados na construção de uma edificação, buscando sempre um desempenho satisfatório aos ocupantes (Feijó, 2013).

As condições de ocupação e uso de uma edificação são também de grande importância para o comportamento térmico, pois os usuários podem interferir e manipular os dispositivos de controle de ventilação e insolação que são capazes de influenciar nas perdas e nos ganhos térmicos do edifício. Portanto, para alcançar o conforto térmico desejado é necessário entender o desempenho térmico de uma edificação como um conjunto de diversos fatores ao qual cada um apresenta uma função (Feijó, 2013).

O calor é transferido do meio para o ambiente construído por intermédio dos mecanismos de condução, radiação e convecção. Nas envoltórias o sentido do fluxo de calor decorre em função da diferença de temperatura externa e interna. O fluxo de calor por meio dos fechamentos depende de diversas propriedades, dentre elas da condutividade térmica, espessura da parede, área de troca, capacidade calorífica do material e massa específica (Feijó, 2013).

De acordo com Callister Júnior e Rethwisch (2024) propriedade térmica refere-se à resposta de um material quando o calor é aplicado. Diversas propriedades térmicas são analisadas nos materiais e elementos construtivos, como: capacidade calorífica, condutividade térmica, difusividade térmica, resistividade térmica e transmitância térmica.

A capacidade calorífica indica a habilidade que um material possui em absorver calor de sua vizinhança, representando a quantidade de energia necessária para gerar na temperatura um aumento unitário (Callister Júnior; Rethwisch, 2024).

Entende-se por condutividade térmica a propriedade que caracteriza a capacidade que um determinado material possui de transferir calor (Callister Júnior; Rethwisch, 2024). Difusividade térmica é o quociente da condutividade térmica pela capacidade do material de armazenar energia térmica (ABNT, 2005d).

Resistência térmica refere-se a propriedade do material em resistir à passagem de calor (Lamberts; Dutra; Pereira, 2014). A transmissão de calor em unidade de tempo e por meio de

uma área unitária de um elemento ou componente construtivo é denominada de transmitância térmica (ABNT, 2024). Ou seja, é o oposto da resistência térmica total (ABNT, 2005d).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) possui normas pertinentes ao desempenho das edificações, intituladas de forma geral como ABNT NBR 15575 – Edificações habitacionais – Desempenho e ABNT NBR 15220 – Desempenho térmico de edificações.

A ABNT NBR 15575 – Edificações habitacionais – Desempenho, visa atender aos requisitos dos usuários referentes aos sistemas que constituem as edificações habitacionais. Sendo dividida em seis partes:

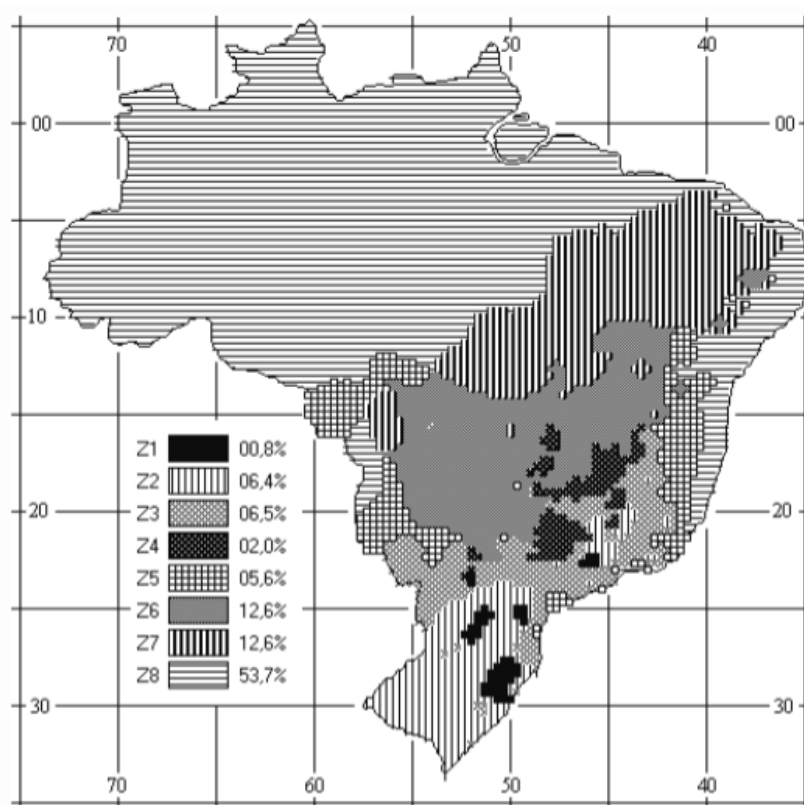
- Parte 1: Requisitos gerais;
- Parte 2: Requisitos para os sistemas estruturais;
- Parte 3: Requisitos para os sistemas de pisos;
- Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas – SVVIE;
- Parte 5: Requisitos para os sistemas de coberturas;
- Parte 6: Requisitos para os sistemas hidrossanitários.

A norma técnica com foco no desempenho térmico das edificações, a ABNT NBR 15220 – Desempenho térmico de edificações, também é dividida em partes ao qual cada uma apresenta suas particularidades, sendo elas:

- Parte 1: Definições, símbolos e unidades;
- Parte 2: Componentes e elementos construtivos das edificações – Resistência e transmitância térmica – Métodos de cálculo (ISO 6946:2017 MOD);
- Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social.

A ABNT NBR 15220-3 (2005e), estabelece a divisão do território brasileiro em oito zonas bioclimáticas distintas. Visando a otimização do desempenho térmico das edificações, elaborou-se um conjunto de sugestões técnico-construtivas para cada uma dessas oito zonas, mediante a melhor adequação climática. A Figura 7 apresenta esse zoneamento bioclimático brasileiro.

Figura 7 – Zoneamento bioclimático brasileiro



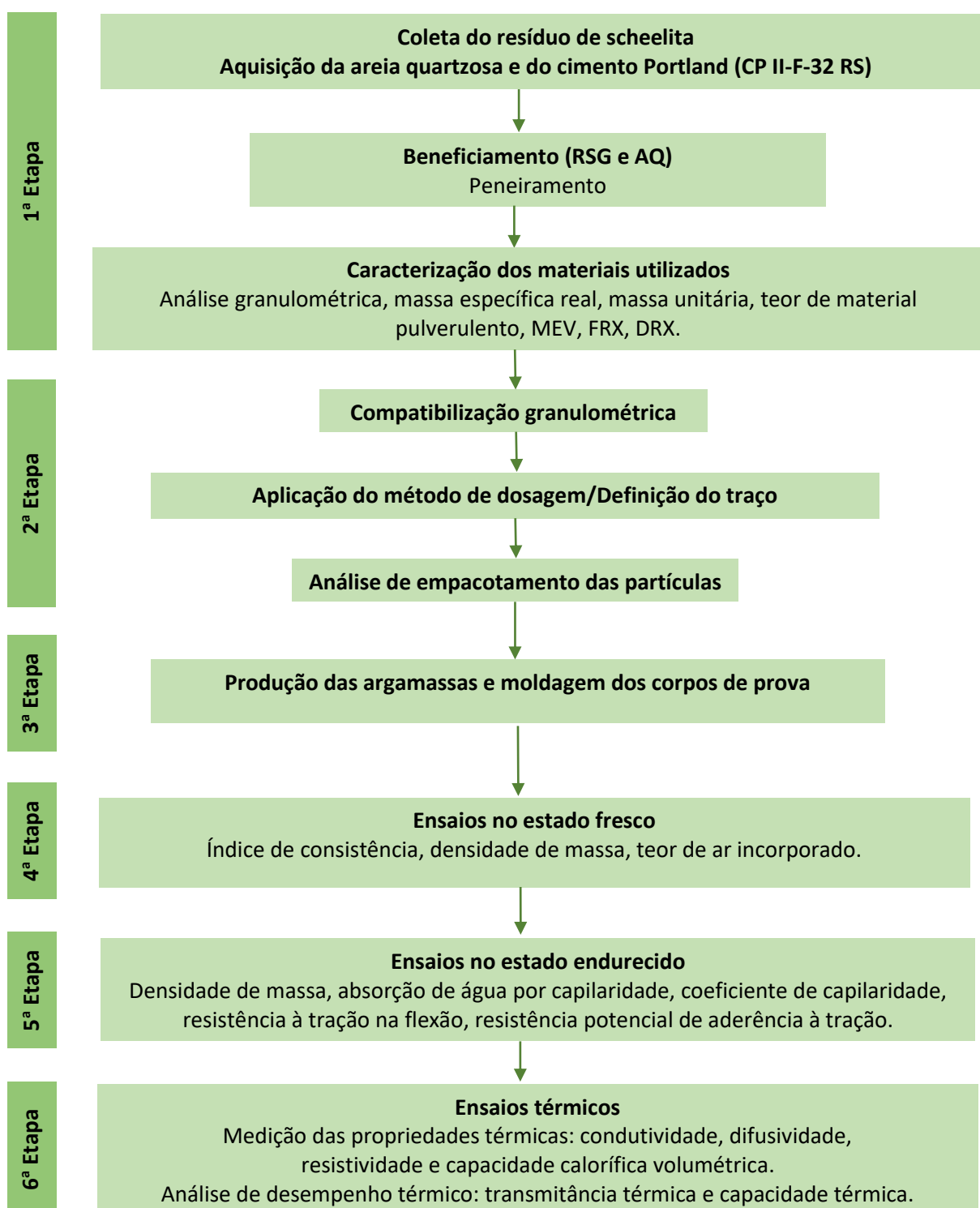
Fonte: ABNT (2005e, p. 2).

Através da Figura 7 é possível observar que o estado do Rio Grande do Norte está inserido em dois tipos de zona: a zona bioclimática 7 (Z7) e a zona bioclimática 8 (Z8). Ou seja, parte das cidades se enquadra na zona Z7, como exemplo, Mossoró-RN, e outra parte na zona Z8, como Natal-RN.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados na produção das argamassas de revestimento analisadas nesta pesquisa são o cimento Portland (CP II-F-32 RS), areia quartzosa (AQ) e resíduo de scheelita grosso (RSG). O procedimento experimental consta de seis etapas, conforme o fluxograma apresentado na Figura 8.

Figura 8 – Fluxograma do procedimento experimental



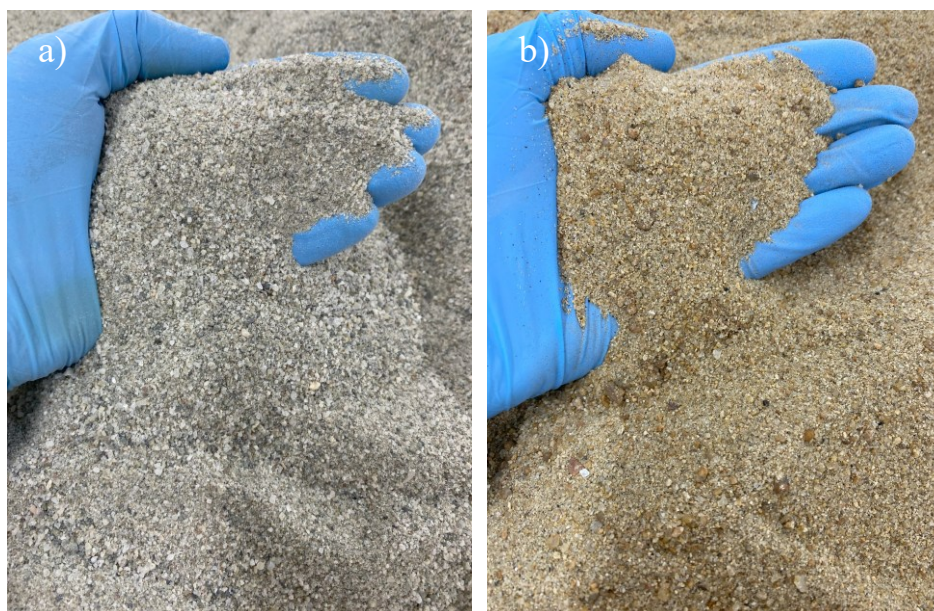
Fonte: Autoria própria (2022).

### 3.1 Coleta, aquisição e beneficiamento dos materiais

O resíduo de scheelita grosso (Figura 9a) utilizado como agregado miúdo nas argamassas de revestimento em substituição a areia quartzosa foi fornecido pela Mina Brejuí localizada no município de Currais Novos-RN, sendo coletado em seu estoque ao ar livre.

A areia quartzosa de origem natural (Figura 9b) foi adquirida em uma loja de materiais de construção da cidade de Mossoró-RN. Oriunda de rio, conhecida como areia lavada, é bastante utilizada em obras locais e da região para a produção de argamassas de revestimento.

Figura 9 – Agregados miúdos utilizados nas argamassas de revestimento: resíduo de scheelita grosso (a) e areia quartzosa natural (b)



Fonte: Arquivos da autora (2022).

Utilizou-se como aglomerante o cimento Portland composto com material carbonático e resistente a sulfatos (CP II-F-32 RS). É um tipo de cimento facilmente encontrado no mercado local, sendo habitualmente empregado nas construções regionais.

Ressalta-se que a água potável utilizada no processo de produção das argamassas de revestimento foi proveniente do sistema público de abastecimento de água da cidade de Mossoró-RN.

Realizou-se o beneficiamento do resíduo de scheelita grosso e da areia quartzosa, ou seja, ambos foram peneirados com o intuito de retirar matéria orgânica presente e grãos de tamanhos não desejados (seixos, etc.). Foram estocados no Laboratório de Materiais de

Construção da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA). O cimento Portland também foi adequadamente armazenado no mesmo local, com todo cuidado necessário para protegê-lo das intempéries capazes de comprometer as suas propriedades.

### 3.2 Caracterização física dos materiais

O resíduo de scheelita grosso e a areia quartzosa foram caracterizados fisicamente pelos ensaios de determinação da composição granulométrica conforme a ABNT NBR 17054 (2022c) (Figura 10), massa específica real regido pela ABNT NBR 16916 (2021c), massa unitária no estado solto e compactado pela ABNT NBR 16972 (2021d), material fino que passa pela peneira de 75  $\mu\text{m}$  por lavagem (material pulverulento) de acordo com a ABNT NBR 16973 (2021e) (Figuras 11a e 11b). Realizados no Laboratório de Materiais de Construção da UFERSA.

Figura 10 – Ensaio de determinação da composição granulométrica



Fonte: Arquivos da autora (2023).

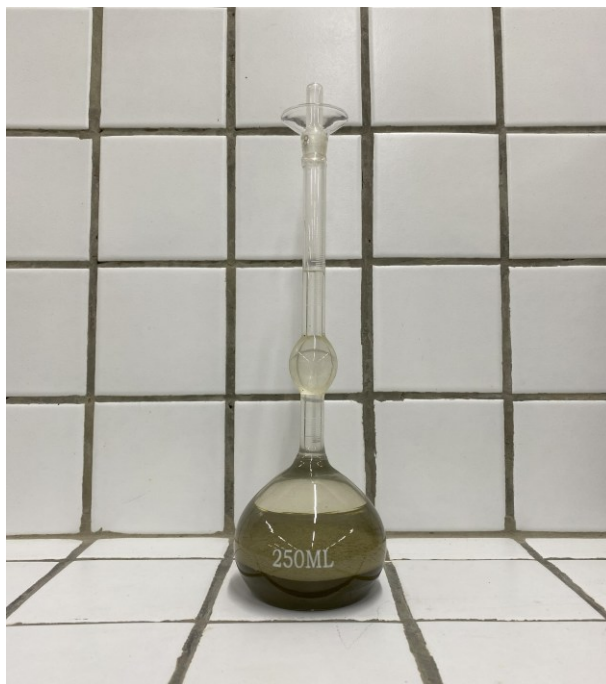
Figura 11 – Determinação do material fino que passa pela peneira de 75  $\mu\text{m}$  por lavagem: resíduo de scheelita grosso (a) e areia quartzosa (b)



Fonte: Arquivos da autora (2023).

As propriedades físicas do cimento Portland (CP II-F-32 RS) foram obtidas por meio dos ensaios de massa específica real regido pela ABNT NBR 16605 (2017) (Figura 12) e massa específica unitária conforme a ABNT NBR 16972 (2021d) realizados no Laboratório de Materiais de Construção da UFERSA. Também foi realizado no Laboratório de Cimentos (LabCim) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) o ensaio de granulometria a laser para determinação do diâmetro médio e  $D_{10}$ ,  $D_{50}$ ,  $D_{90}$  utilizando o granulômetro a laser CILAS 1090.

Figura 12 – Ensaio de massa específica real do cimento Portland (CP II-F-32 RS)



Fonte: Arquivos da autora (2023).

### **3.3 Caracterização microestrutural, química e mineralógica do resíduo de scheelita grosso e da areia quartzosa**

O resíduo de scheelita grosso e a areia quartzosa foram caracterizados microestruturalmente, quimicamente e mineralogicamente, respectivamente, pelos métodos de ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV), fluorescência de raios X (FRX) e difratometria de raios X (DRX).

Para a realização do ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) no Laboratório de Microscopia Eletrônica da UFERSA, ambos os materiais, por não serem condutores passaram, primeiramente, por um processo de metalização, ou seja, um banho de ouro foi realizado, pulverizando-os com uma camada de espessura de 9 nm, por meio do Q150R ES (Quorum Technologies Ltd., Laughton, East Sussex, Reino Unido), como mostra a Figura 13. Após esse preparo, o ensaio foi executado utilizando o Microscópio Tescan Vega 3 LMU (República Tcheca) ao qual operou com um feixe de elétrons de 20 kV obtendo imagens com ampliações de 30 e 80x, conforme apresenta a Figura 14.

Figura 13 – Equipamento que realiza o processo de metalização



Fonte: Arquivos da autora (2023).

Figura 14 – Microscópio Tescan Vega 3 LMU (República Tcheca) realizando o ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV)



Fonte: Arquivos da autora (2023).

Os materiais foram caracterizados quimicamente por meio do ensaio de fluorescência de raios X (FRX) com o intuito de identificar a composição química e a concentração dos

elementos químicos presentes no RSG e na areia quartzosa. O ensaio foi realizado no Centro de Síntese e Análise de Materiais Avançados (CSAMA) da Universidade do Estado do Rio Grande do Norte (UERN), utilizando o Espectrômetro de Fluorescência de Raios X – EFRX (Shimadzu, modelo EDX-7000), as análises foram realizadas em atmosfera de medição a vácuo.

O ensaio de difratometria de raios X (DRX) foi executado no Laboratório de Raios X da Universidade Federal do Ceará (UFC) com o equipamento PANalytical X'Pert PRO e faixa de varredura ( $2\theta$ ) de  $10^\circ$  a  $80^\circ$ . Para o ensaio ser realizado foi necessário, primeiramente, peneirar os materiais em uma peneira de 230 mesh.

### **3.4 Metodologia de dosagem**

#### **3.4.1 Compatibilização granulométrica**

A determinação das porcentagens de resíduo de scheelita grosso que substituem parcialmente a areia quartzosa foi realizada buscando um Teor Fixo a ser Determinado (TFD) do RSG, por meio da compatibilização granulométrica, considerando a distribuição dos tamanhos das partículas obtidos pelo ensaio de determinação da composição granulométrica tanto da areia como do resíduo de scheelita grosso.

Com o intuito de obter uma curva de distribuição granulométrica mais ajustada possível da zona ótima estabelecida pela ABNT NBR 7211 (2022a) uma curva ótima teórica, ou seja, uma Curva Ótima Média (COM) foi produzida, a partir dos valores médios dos limites inferiores e superiores apresentados por essa norma.

Com o auxílio do software Excel, utilizou-se o Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) e o módulo SOLVER (método Generalized Reduced Gradient (GRG)) para determinar os valores do TFD variando de 0% a 100%, de forma que a soma dos quadrados dos erros da série de peneiras do material retido entre as curvas teóricas da mistura do RSG mais a areia quartzosa e a Curva Ótima Média fosse minimizado. Ou seja, o método dos mínimos quadrados foi aplicado para determinar a soma dos quadrados dos erros entre as curvas. Ressalta-se, que esse mesmo método foi aplicado por Medeiros (2019).

Analisando a curva granulométrica do RSG, observou-se que esse resíduo apresenta um déficit de tamanhos de partículas retidas nas peneiras de aberturas 1,18 mm e 2,36 mm, com isso optou-se por utilizar as frações de areia quartzosa retidas nessas peneiras, misturadas

com o TFD, para simular o melhor ajuste teórico e comparar com a granulometria experimental.

Obtido o TFD do RSG e as porcentagens de areia retida nas peneiras de 1,18 mm e 2,36 mm, pelo método prescrito acima, as duas misturas foram produzidas no Laboratório de Materiais de Construção da UFERSA e realizada a caracterização física das mesmas (composição granulométrica, curva granulométrica, massa específica real, massa unitária no estado solto e compactado). As curvas granulométricas das misturas teóricas e experimentais foram analisadas para verificar a similaridade de ambas.

### 3.4.2 Definição do traço

Os traços das quatro argamassas de revestimento produzidas: 100% de areia quartzosa (referência); 100% de resíduo de scheelita grosso; 88% de resíduo de scheelita grosso e 12% de areia quartzosa retida na peneira de abertura 1,18 e de 87% de resíduo de scheelita grosso e 13% de areia quartzosa retida na peneira de abertura 2,36, foram definidos conforme a metodologia de dosagem proposta por Santos *et al.* (2018).

Uma metodologia cujo objetivo é obter traços em que se tenha conhecimento do coeficiente de vazios deixados pelo agregado, de forma que possam ser preenchidos pelos demais materiais: cimento, cal e água, e até mesmo definir um percentual de poros, ou seja, teor de ar incorporado que se deseja para a argamassa. Por meio desse método, a determinação da quantidade de materiais deixa de ser arbitrada e passa a ser em função do tipo de agregado utilizado, sendo necessário apenas conhecer sua massa específica unitária seca compacta e a real (Santos *et al.*, 2018).

O método de dosagem de Santos *et al.* (2018) foi aplicado com o intuito de obter apenas por meio das equações propostas o teor do agregado miúdo e do aglomerante. Não realizando a parte de confecção de gráficos que correlacionam os valores das propriedades e os percentuais dos materiais usados, para definição do traço ideal.

O consumo percentual de agregado miúdo das argamassas foi determinado através da seguinte equação, obtida por meio do conceito do coeficiente de vazios:

$$P_{areia} = 100 - \left[ \left( 1 - \frac{\gamma_u}{\gamma_r} \right) \cdot 100 \right]$$

Onde:

$P_{areia}$  = teor de agregados miúdos no traço (%);

$\gamma_u$  = massa específica unitária compacta do agregado miúdo ( $\text{g/cm}^3$ );

$\gamma_r$  = massa específica real do agregado miúdo ( $\text{g/cm}^3$ ).

Encontrado o consumo do agregado miúdo e considerando inicialmente uma quantidade de água de 15% como recomendada, sendo posteriormente ajustada conforme o ensaio do índice de consistência, como este trabalho não se trata de uma argamassa mista, não foi utilizado a cal, o consumo percentual do aglomerante (cimento) foi obtido pela equação:

$$P_{cimento} = 100 - (P_{areia} + P_{água})$$

Onde:

$P_{cimento}$  = teor de aglomerante no traço (%);

$P_{areia}$  = teor de agregados miúdos no traço (%);

$P_{água}$  = teor de água no traço (%).

Sendo a quantidade de água final definida pelo ensaio de determinação do índice de consistência, de acordo com a ABNT NBR 13276 (2016a), considerando uma quantidade necessária para um índice de consistência de  $260 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$ , conforme recomenda a ABNT NBR 16541 (2016b).

### 3.4.3 Análise de empacotamento das partículas

Com o intuito de verificar a distribuição de tamanho das partículas das misturas de materiais que constituem as argamassas de revestimento estudadas, analisando qual mistura possui um melhor empacotamento e comparando-as com a argamassa de referência, os traços encontrados para os quatro tipos de argamassas foram analisados no *software* EMMA Mix Analyzer.

Para o empacotamento o método de cálculo utilizado foi o de Andreassen modificado. O coeficiente de distribuição (q) considerado foi de 0,32 por ser referente à mistura de concretos de ultra-alta resistência, um concreto que se assemelha a argamassa.

Os gráficos gerados no *software* EMMA Mix Analyzer, foram também plotados no *software* OriginPro, com a finalidade de calcular as áreas entre as curvas para averiguar quais são as curvas dos traços que mais se aproximam da curva do empacotamento ideal.

### **3.5 Produção das argamassas e moldagem dos corpos de prova**

As argamassas foram produzidas conforme as recomendações estabelecidas pela norma de preparo da mistura para a realização de ensaios das argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos a ABNT NBR 16541 (2016b).

Os corpos de prova foram moldados logo após o preparo das argamassas conforme o modelo e as dimensões indicadas pelas normas dos ensaios realizados no estado endurecido.

Para os ensaios de densidade de massa no estado endurecido, absorção de água por capilaridade, coeficiente de capilaridade e resistência à tração na flexão, foram moldados corpos de prova prismáticos de 4 cm x 4 cm x 16 cm. Para os ensaios de resistência potencial de aderência à tração ao substrato e à tração superficial foi necessário preparar, primeiramente, os substratos-padrão de concreto de 55 cm x 60 cm ao qual foram revestidos com as argamassas estudadas e nelas ensaiadas os corpos de prova. Os ensaios para medição das propriedades térmicas das argamassas foram realizados em corpos de prova cilíndricos de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura.

### **3.6 Ensaios no estado fresco**

Os ensaios no estado fresco de índice de consistência, densidade de massa e teor de ar incorporado efetuados nas argamassas de revestimento, foram executados no Laboratório de Materiais de Construção da UFERSA – Campus Mossoró.

#### **3.6.1 Determinação do índice de consistência**

O ensaio para determinação do índice de consistência (Figura 15) foi realizado nas argamassas conforme a ABNT NBR 13276 (2016a) com o intuito de verificar se a quantidade de água inicial adotada para a produção das argamassas era ideal para apresentar um índice de consistência de  $260 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$ . Caso o índice de consistência não se enquadrasse nesse valor, era feito um ajuste na quantidade de água e refeito o ensaio até obter a consistência desejada. Assim, a quantidade de água ideal para cada traço foi obtida.

Figura 15 – Realização de ensaio para determinação do índice de consistência



Fonte: Arquivos da autora (2023).

### 3.6.2 Densidade de massa no estado fresco e teor de ar incorporado

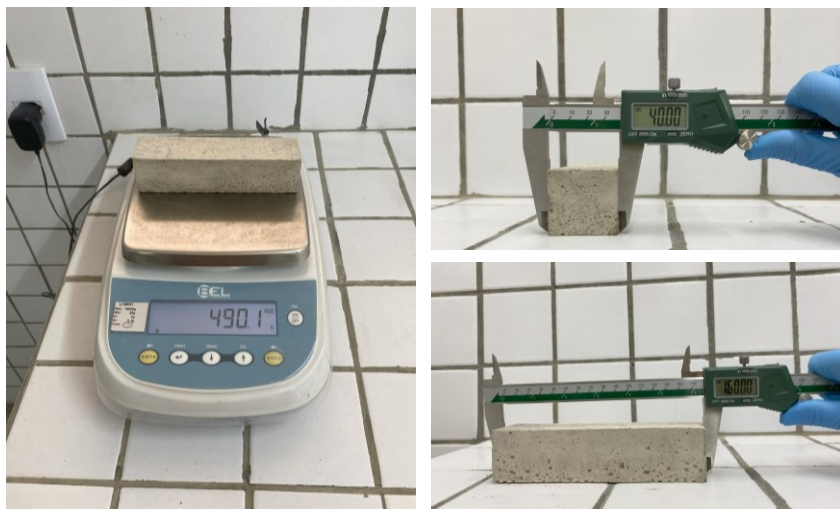
Logo após a produção das argamassas foi realizado o ensaio para determinar a densidade de massa no estado fresco e o teor de ar incorporado, conforme prescreve a ABNT NBR 13278 (2005a) - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado.

## 3.7 Ensaios no estado endurecido

### 3.7.1 Densidade de massa aparente no estado endurecido

Aos 28 dias da moldagem e cura, foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção da UFERSA – Campus Mossoró, o ensaio de densidade de massa aparente no estado endurecido nos corpos de prova das argamassas de revestimento, pelo método de ensaio da ABNT NBR 13280 (2005c), como apresenta a Figura 16.

Figura 16 – Ensaio de densidade de massa no estado endurecido



Fonte: Arquivos da autora (2023).

### 3.7.2 Absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade

A absorção de água por capilaridade e o coeficiente de capilaridade das argamassas no estado endurecido foram determinados através do método de ensaio prescrito pela ABNT NBR 15259 (2005f). O ensaio, apresentado na Figura 17, foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção da UFERSA – Campus Mossoró, aos 28 dias de idade dos corpos de prova.

Figura 17 – Ensaio de absorção de água por capilaridade



Fonte: Arquivos da autora (2023).

### 3.7.3 Resistência à tração na flexão

O ensaio de resistência à tração na flexão (Figura 18) foi realizado no Laboratório de Ensaaios Mecânicos da UFERSA – Campus Mossoró, consoante o método de ensaio regido pela ABNT NBR 13279 (2005b). As rupturas ocorreram nos corpos de prova das argamassas na idade de 28 dias.

Figura 18 – Ensaio de resistência à tração na flexão



Fonte: Arquivos da autora (2023).

### 3.7.4 Resistência potencial de aderência à tração ao substrato e à tração superficial

Para a realização dos ensaios de resistência potencial de aderência à tração ao substrato e resistência potencial à tração superficial, primeiramente, foram confeccionados quatro substratos-padrão conforme a ABNT NBR 14081-2 (2015), com espessura de 2,5 cm e dimensões de 55 cm x 60 cm. Aos quais, na idade de 28 dias, foram revestidos com as argamassas a serem ensaiadas.

As argamassas de revestimento passaram por um processo de cura de 28 dias. Nessa idade, os ensaios de resistência potencial de aderência à tração ao substrato e resistência potencial à tração superficial foram realizados, conforme recomenda a ABNT NBR 15258 (2021a) (Figura 19) no Laboratório de Construção Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN) – Campus Mossoró.

Figura 19 – Ensaio de resistência potencial de aderência à tração ao substrato e superficial



Fonte: Arquivos da autora (2024).

### 3.8 Ensaios térmicos

#### 3.8.1 Propriedades térmicas

As argamassas foram analisadas termicamente por meio das propriedades: condutividade, difusividade, resistividade térmica e capacidade calorífica volumétrica, utilizando o equipamento KD2 Pro Thermal Analyzer fabricado pela Decagon Devices Inc. do Laboratório de Transferência de Calor (LTC) da UFRN.

Para a realização desse ensaio, foram moldados para cada tipo de argamassa quatro corpos de prova cilíndricos de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura (Figura 20). Como se trata de um material rígido, os furos para a inserção da sonda SH-1 que é acoplada ao equipamento para a realização do ensaio, foram produzidos conforme o gabarito, durante o processo de moldagem dos corpos de prova, ou seja, com a argamassa no estado fresco.

Figura 20 – Corpos de prova para realização do ensaio térmico



Fonte: Arquivos da autora (2024).

Após 28 dias em processo de cura, os corpos de prova foram ensaiados. A sonda SH-1 antes de ser introduzida no corpo de prova foi revestida com pasta térmica. Eles foram inseridos em uma espécie de câmara de testes produzida com material plástico e preenchidos os espaços entre o corpo de prova e a parede da câmara com flocos de poliestireno expandido, com o intuito de garantir a isolamento térmica do material com o ambiente (Figura 21). Cinco medições foram realizadas em cada corpo de prova.

Figura 21 – Ensaio térmico com o equipamento KD2 Pro Thermal Analyzer



Fonte: Arquivos da autora (2024).

### 3.8.2 Desempenho térmico

Com o intuito de avaliar o desempenho térmico de paredes externas idealizadas constituídas por blocos cerâmicos (9 cm x 19 cm x 19 cm) de oito furos, assentados na menor dimensão e revestidos em ambas as faces com as argamassas de revestimento objetos de estudo desta pesquisa, primeiramente, calculou-se a transmitância térmica e a capacidade térmica desses elementos, conforme o método de cálculo simplificado especificado pela ABNT NBR 15220-2 (2022b).

Em seguida, verificou-se se esses parâmetros atendem ao desempenho térmico mínimo obrigatório de sistemas de vedações verticais externas (SVVE) para ambientes de permanência prolongada de unidade habitacional, através do procedimento simplificado conforme a ABNT NBR 15575-4 (2021b).

### 3.9 Análise estatística

Os resultados dos ensaios foram organizados em planilhas no *software* Excel e aplicou-se o teste de normalização Shapiro-Wilk e de homogeneidade Levene. Posteriormente, com o auxílio do *software* Sisvar, os resultados obtidos nos ensaios realizados nas argamassas no estado endurecido e das propriedades térmicas foram analisados estatisticamente por meio da análise de variância (ANOVA) seguido da aplicação do teste de Tukey com 95% de confiança, com o intuito de comparar as médias entre os diferentes tipos de argamassas de revestimento produzidas.

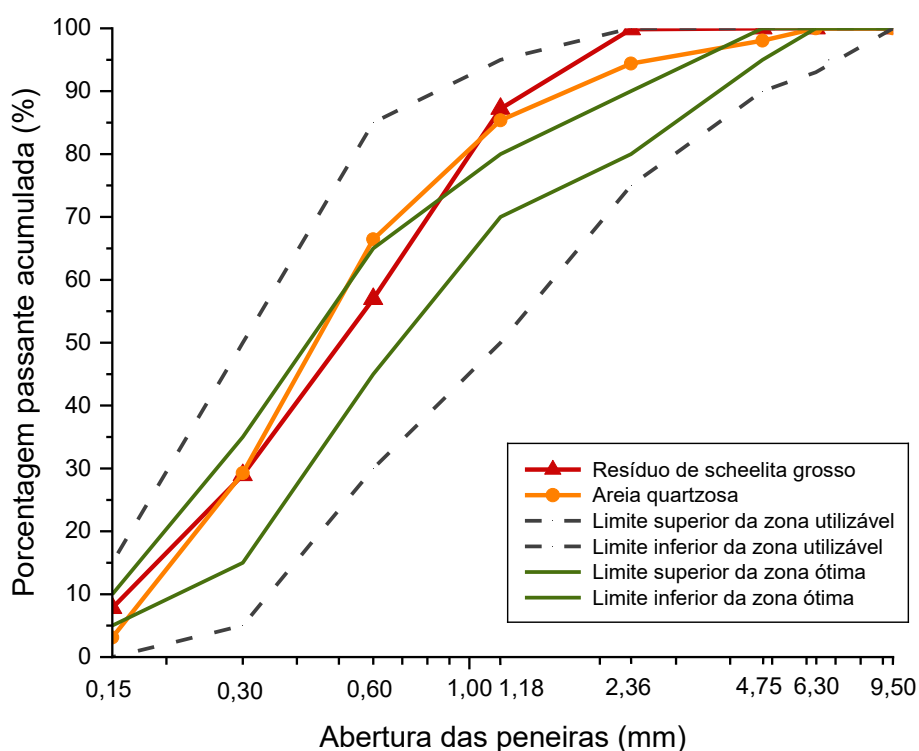
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Caracterização física do resíduo de scheelita grosso e da areia quartzosa

O resíduo de scheelita grosso como foi incorporado nas argamassas de revestimento estudadas em substituição total e parcial da areia quartzosa, os resultados dos ensaios de caracterização desses materiais serão analisados conjuntamente.

As curvas granulométricas do resíduo de scheelita grosso e da areia quartzosa são apresentadas no Gráfico 1. Observa-se que ambas se encontram dentro dos limites estabelecidos (limites superior e inferior da zona utilizável e limites superior e inferior da zona ótima). Portanto, conforme a ABNT NBR 7211 (2022a) esse resíduo pode ser utilizado como agregado miúdo em argamassas de revestimento, assim como, a areia quartzosa.

Gráfico 1 – Curvas granulométricas do resíduo de scheelita grosso e da areia quartzosa



Fonte: Autoria própria (2023).

É interessante observar que uma parte considerável da curva granulométrica do RSG está dentro da zona ótima, ou seja, em quase todas as faixas de peneiramento o resíduo se encontra dentro dessa zona. Estando apenas na zona utilizável as faixas de abertura da peneira

de 1,18 mm e 2,36 mm, indicando que o RSG apresenta um déficit dessa granulometria mais grossa. Quanto a areia quartzosa, nota-se que a sua curva granulométrica passa ligeiramente na zona ótima, estando a maior parte na zona utilizável.

A Tabela 1 apresenta as propriedades físicas: dimensão máxima característica, módulo de finura, massa específica real, massa unitária no estado compactado, massa unitária no estado solto e o teor de material fino que passa pela peneira de 75  $\mu\text{m}$  por lavagem (teor de material pulverulento) do resíduo de scheelita grosso e da areia quartzosa.

Tabela 1 – Propriedades físicas do resíduo de scheelita grosso e da areia quartzosa

| Propriedades Físicas                                             | Material |      |
|------------------------------------------------------------------|----------|------|
|                                                                  | RSG      | AQ   |
| Dimensão máxima característica (mm)                              | 2,36     | 2,36 |
| Módulo de finura                                                 | 2,19     | 2,23 |
| Massa específica real ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )                 | 2,81     | 2,58 |
| Massa unitária do agregado compactado ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) | 1,74     | 1,59 |
| Massa unitária do agregado solto ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )      | 1,61     | 1,52 |
| Teor de material pulverulento (%)                                | 3,93     | 1,50 |

Fonte: Autoria própria (2023).

O RSG e a AQ apresentam granulometria próxima, pois os módulos de finura são praticamente iguais. Como pode ser visto na Tabela 1, o resíduo de scheelita grosso possui a massa específica real e as massas unitárias maiores do que as da areia quartzosa, corroborando com as análises realizadas por Nascimento *et al.* (2021).

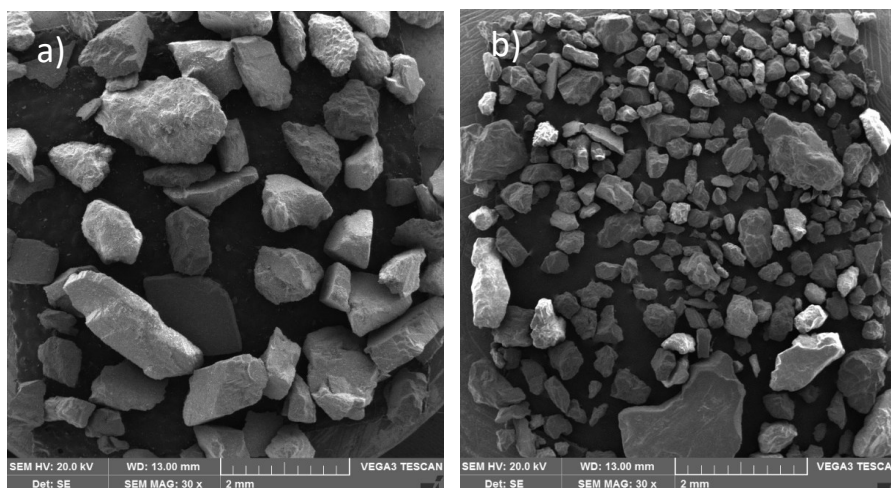
No presente estudo a massa específica real do RSG é aproximadamente 9% maior que a da areia. Tal condição resultará em uma argamassa mais pesada, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido.

O RSG apresenta uma maior quantidade de material fino que passa pela peneira de 75  $\mu\text{m}$  por lavagem (material pulverulento) em relação à areia quartzosa. Mas, ambos são aceitáveis como agregado miúdo a ser utilizado em argamassas de revestimento, por estarem dentro dos limites estabelecidos pela ABNT NBR 7211 (2022a).

#### 4.2 Caracterização microestrutural do resíduo de scheelita grosso e da areia quartzosa

Através das imagens obtidas pelo ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) é possível observar que o resíduo da scheelita grosso e a areia quartzosa possuem uma microestrutura parecida, composta por partículas arredondadas, angulares e lamelares. Sendo que a areia apresenta partículas mais uniformes, predominando as angulares devido o processo natural de erosão e o resíduo partículas de tamanhos e formas mais variadas, com predominância das lamelares devido o próprio processo de britagem. Como mostra as Figuras 22a e 22b.

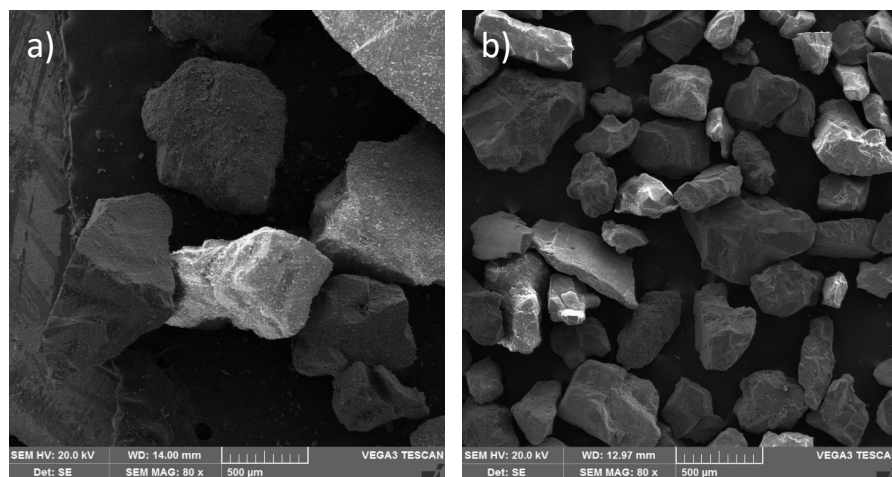
Figura 22 – Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com ampliação de 30x: resíduo de scheelita grosso (a) e areia quartzosa (b)



Fonte: Arquivos da autora (2023).

Com esse ensaio, foi possível notar também, pelas Figuras 23a e 23b, que na superfície das partículas do RSG há presença de materiais finos aderidos, o que não é perceptível nas partículas da areia quartzosa. Corroborando com a microscopia realizada por Medeiros (2019) ao qual apresentou que os grãos do resíduo de scheelita possuem material fino aderido em sua superfície e são lamelares.

Figura 23 – Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com ampliação de 80x: resíduo de scheelita grosso (a) e areia quartzosa (b)



Fonte: Arquivos da autora (2023).

#### 4.3 Caracterização química do resíduo de scheelita grosso e da areia quartzosa

Por meio do ensaio de fluorescência de raios X (FRX), realizado no resíduo de scheelita grosso e na areia quartzosa, foi possível determinar a composição química desses materiais, conforme apresenta a Tabela 2 e a Tabela 3.

Tabela 2 – Caracterização química do resíduo de scheelita grosso - FRX

| Resíduo de scheelita grosso |                  |                                |                                |                  |                 |        |
|-----------------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|-----------------|--------|
| CaO                         | SiO <sub>2</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | K <sub>2</sub> O | SO <sub>3</sub> | Outros |
| 60,61%                      | 17,12%           | 12,60%                         | 4,20%                          | 1,48%            | 1,24%           | 2,76%  |

Fonte: Autoria própria (2023).

Tabela 3 – Caracterização química da areia quartzosa - FRX

| Areia quartzosa  |                  |                                |                                |       |                 |        |
|------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|-----------------|--------|
| SiO <sub>2</sub> | K <sub>2</sub> O | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO   | SO <sub>3</sub> | Outros |
| 64,23%           | 9,43%            | 8,89%                          | 7,50%                          | 4,90% | 2,63%           | 2,42%  |

Fonte: Autoria própria (2023).

Os componentes químicos principais do RSG são o óxido de cálcio (CaO), dióxido de silício (SiO<sub>2</sub>), óxido de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e o óxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Esses quatro componentes, também foram encontrados como os quatro mais significativos em resíduos de

scheelita analisados em diversas pesquisas (Medeiros, 2016; Medeiros, 2019; Paiva, 2013), variando a porcentagem.

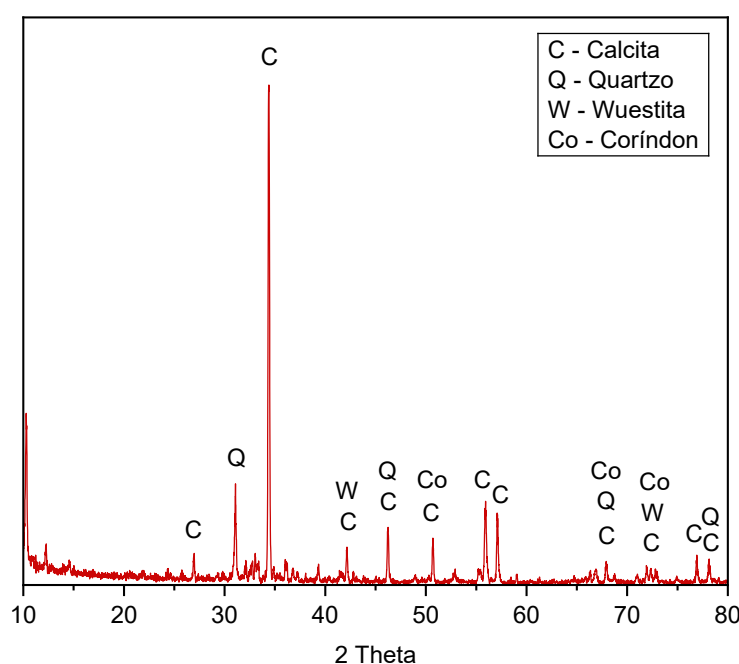
Quanto a areia quartzosa, o componente mais expressivo em quantidade é o dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ), seguido do óxido de potássio ( $\text{K}_2\text{O}$ ), óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Constituindo cerca de 90% do total de componentes presentes na amostra.

É interessante observar nas tabelas, que os seis principais óxidos constituintes do resíduo de scheelita grosso são os mesmos encontrados na areia quartzosa, variando apenas a concentração presente na amostra. Ou seja, os componentes químicos significativos que compõem o RSG são similares aos que instituem a areia quartzosa, porém, apresentam porcentagens diferentes.

#### 4.4 Caracterização mineralógica do resíduo de scheelita grosso e da areia quartzosa

Mediante o ensaio de difratometria de raios X (DRX) foi possível realizar a caracterização mineralógica do resíduo de scheelita grosso e da areia quartzosa. Observa-se no difratograma de raios X do resíduo de scheelita grosso (Gráfico 2) que os picos de calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) são predominantes. Havendo também em sua composição quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), wuestita ( $\text{FeO}$ ) e coríndon ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Corroborando com os resultados obtidos na análise química realizada pelo ensaio de fluorescência de raios X (FRX) apresentados na Tabela 2.

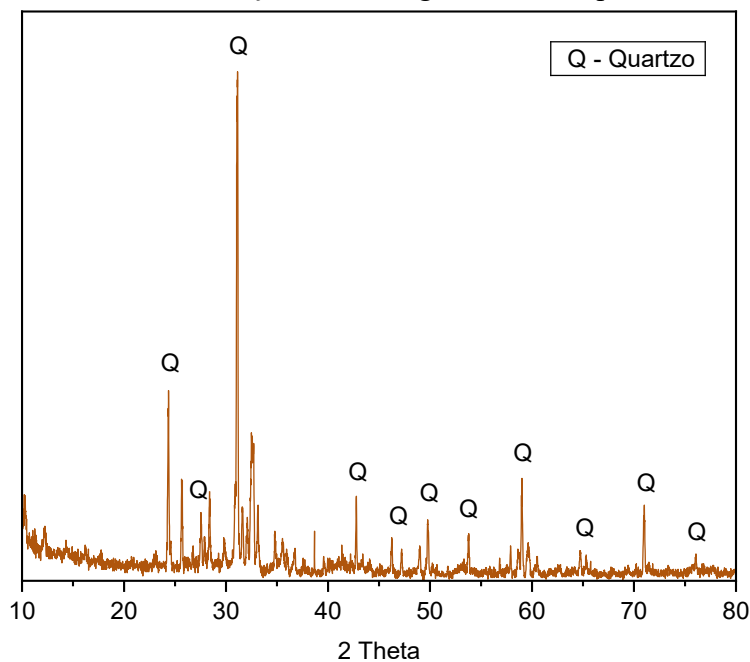
Gráfico 2 – Caracterização mineralógica do resíduo de scheelita grosso – DRX



Fonte: A autoria própria (2023).

O Gráfico 3 mostra o difratograma de raios X da areia quartzosa, ao qual se verifica a presença majoritária de picos de quartzo ( $\text{SiO}_2$ ). Um resultado esperado, visto que a caracterização química realizada por fluorescência de raios X (FRX) nesse material, obteve o dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) como o principal componente químico. Ou seja, os resultados de ambas as análises foram condizentes.

Gráfico 3 – Caracterização mineralógica da areia quartzosa – DRX



Fonte: Autoria própria (2023).

#### 4.5 Caracterização física do cimento Portland

A Tabela 4 apresenta a massa específica e a massa unitária no estado solto do cimento Portland (CP II-F-32 RS) utilizado como aglomerante nas argamassas de revestimento desta pesquisa. Ressalta-se que os valores obtidos se assemelham aos determinados por Macedo (2021) que também utilizou em sua pesquisa o CP II-F-32 e com os apresentados na ficha técnica do fornecedor.

Tabela 4 – Propriedades físicas do cimento Portland (CP II-F-32 RS)

| <b>Propriedades Físicas</b>                         | <b>Material<br/>Cimento Portland</b> |
|-----------------------------------------------------|--------------------------------------|
| Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )               | 3,03                                 |
| Massa unitária no estado solto (g/cm <sup>3</sup> ) | 1,01                                 |

Fonte: Autoria própria (2023).

Quanto ao tamanho das partículas, o diâmetro médio e os diâmetros a 10%, 50% e 90% obtidos por meio do ensaio de granulometria a laser são indicados na Tabela 5.

Tabela 5 – Tamanho das partículas do cimento Portland (CP II-F-32 RS)

| <b>Propriedades</b>                                      | <b>Material<br/>Cimento Portland</b> |
|----------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| Diâmetro médio (μm)                                      | 13,62                                |
| D <sub>10</sub> , D <sub>50</sub> , D <sub>90</sub> (μm) | 0,51 – 7,82 – 36,85                  |

Fonte: Autoria própria (2023).

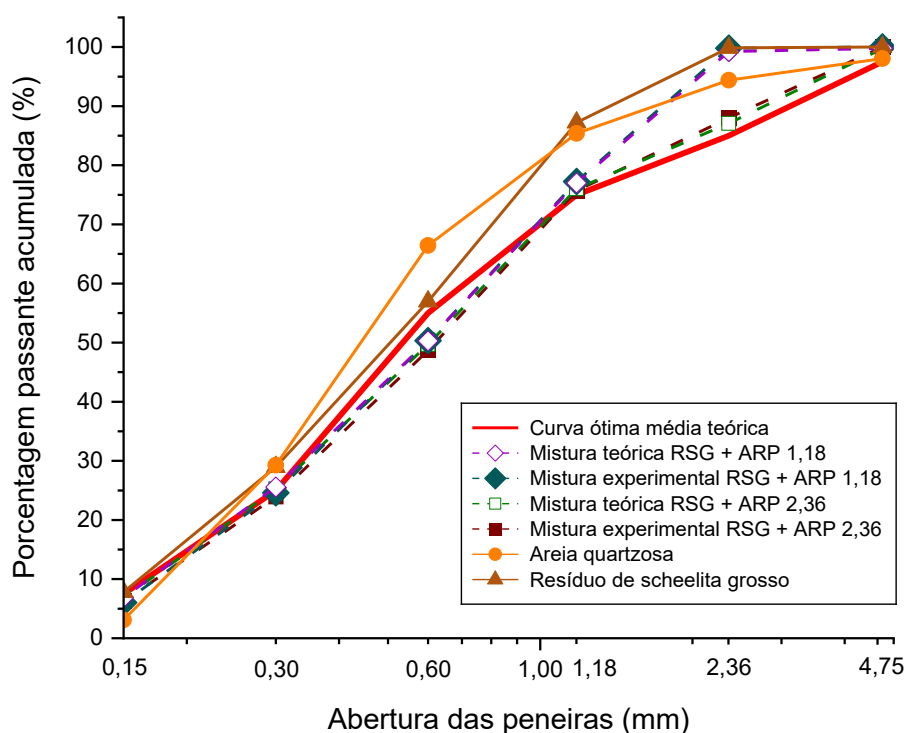
#### 4.6 Compatibilização granulométrica

Como pode ser observado no Gráfico 1, as curvas granulométricas do resíduo de scheelita grosso e da areia quartzosa não estão totalmente inseridas na zona ótima. Com o intuito de obter um agregado no qual a curva granulométrica se enquadrasse totalmente ou uma parte considerável na zona ótima, realizou-se a compatibilização granulométrica para obtenção de misturas compostas por resíduo de scheelita grosso e areia quartzosa retida nas peneiras (ARP) de 1,18 mm e 2,36 mm. Lembrando que foram escolhidas as frações de areia retidas nessas peneiras devido o RSG apresentar um déficit de tamanho dessas partículas.

A aplicação do método de compatibilização granulométrica resultou em dois tipos de misturas, uma composta por 88% RSG + 12% ARP 1,18 e a outra por 87% RSG + 13% ARP 2,36. O Gráfico 4 mostra que a curva granulométrica do resíduo de scheelita grosso se aproxima da curva ótima média em uma boa parte, distanciando apenas nas faixas de abertura das peneiras 1,18 mm e 2,36 mm. Diferentemente da areia quartzosa que não apresenta uma boa aproximação. A curva granulométrica teórica da mistura de RSG + ARP 2,36 ficou mais próxima da curva ótima média do que a curva granulométrica teórica de RSG + ARP 1,18. O

que pode ser comprovado pela Tabela 6 que apresenta os erros entre as curvas das misturas teóricas (CMT) e a curva ótima média (COM).

Gráfico 4 – Curvas granulométricas



Fonte: Autoria própria (2023).

Tabela 6 – Erros entre as curvas teóricas e a curva ótima média

| Mistura        | Maior Erro                   | Somatório dos Erros                |
|----------------|------------------------------|------------------------------------|
|                | $ P_{COM} - P_{CMT} ^{2(1)}$ | $\Sigma P_{COM} - P_{CMT} ^{2(2)}$ |
| RSG + ARP 1,18 | 0,0202                       | 0,0234                             |
| RSG + ARP 2,36 | 0,0028                       | 0,0039                             |

Fonte: Autoria própria (2023).

<sup>(1)</sup> Maior erro pelo MMQ da série de peneiras. <sup>(2)</sup> Somatório dos erros pelo MMQ da série de peneiras.

Obtidas as proporções dos materiais e as curvas granulométricas teóricas, as misturas foram realizadas no laboratório e em seguida os ensaios de caracterização física para determinar a composição granulométrica, dimensão máxima característica, módulo de finura, massa específica real, massa unitária no estado solto e compactado. Diante dos resultados da composição granulométrica, as curvas granulométricas experimentais das misturas foram produzidas e analisadas graficamente.

Observando o Gráfico 4, é notável que as curvas granulométricas experimentais de ambas as misturas são praticamente iguais às curvas granulométricas teóricas, mostrando o bom desempenho do método utilizado para a realização da compatibilização granulométrica. O TFD e as curvas granulométricas obtidas pelo *software* Excel utilizando o MMQ condizem com a realidade, alcançando o objetivo desejado. O RSG + ARP 1,18 foi a mistura que apresentou o menor erro absoluto entre as curvas das misturas teóricas (CMT) e as curvas das misturas experimentais (CME) como pode ser visto na Tabela 7.

Tabela 7 – Erros entre as curvas teóricas e experimentais

| Misturas       | Maior Erro Absoluto                      | Somatório dos Erros Absolutos                  |
|----------------|------------------------------------------|------------------------------------------------|
|                | $ P_{CMT} - P_{CME} $ (%) <sup>(1)</sup> | $\Sigma P_{CMT} - P_{CME} $ (%) <sup>(2)</sup> |
| RSG + ARP 1,18 | 0,96                                     | 2,90                                           |
| RSG + ARP 2,36 | 1,30                                     | 4,37                                           |

Fonte: Autoria própria (2023).

<sup>(1)</sup> Maior erro absoluto da série de peneiras. <sup>(2)</sup> Somatório dos erros absolutos da série de peneiras.

A Tabela 8 apresenta as propriedades físicas dos dois tipos de misturas. Ambas as misturas consistem em agregados miúdos com módulo de finura da zona ótima conforme especificado pela ABNT NBR 7211 (2022a). As massas unitárias tanto no estado solto quanto no estado compactado das misturas são um pouco maiores que as do resíduo de scheelita grosso e da areia quartzosa, como pode ser observado nas Tabelas 1 e 8. Isso mostra que houve uma melhoria na compacidade dos agregados, ao misturar as partículas de areia retidas nas peneiras de 1,18 mm e 2,36 mm com o RSG que apresenta uma granulometria mais fina, ou seja, com déficit dessas faixas de tamanhos de partículas mais grossas.

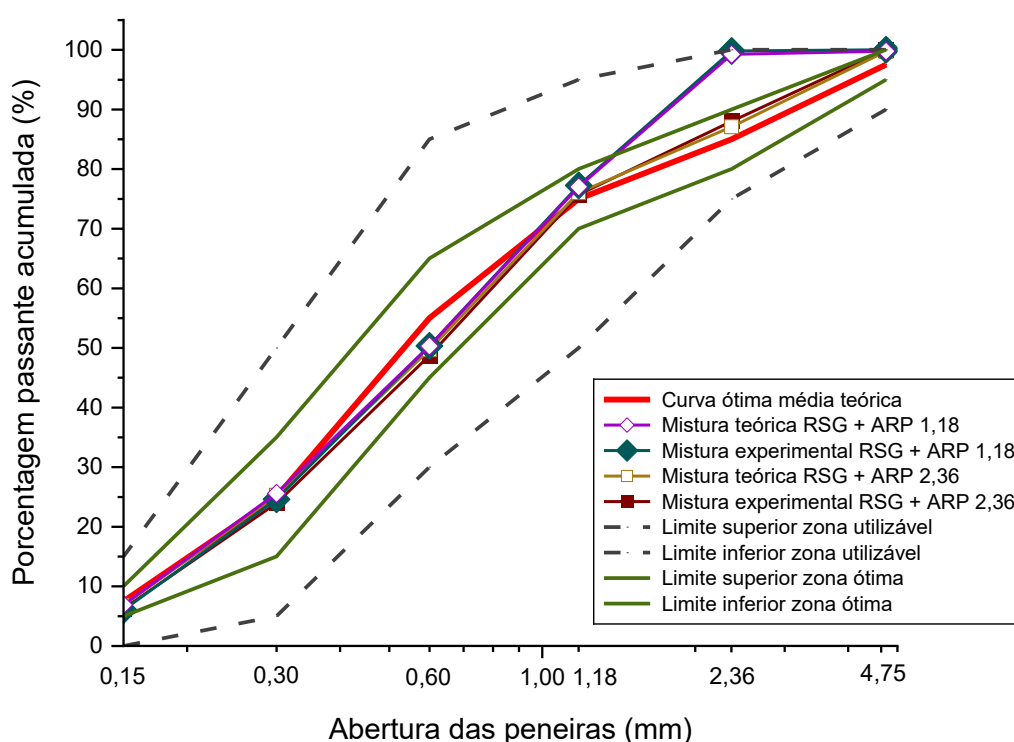
Tabela 8 – Propriedades físicas das misturas

| Propriedades Físicas                                       | Mistura        |                |
|------------------------------------------------------------|----------------|----------------|
|                                                            | RSG + ARP 1,18 | RSG + ARP 2,36 |
| Dimensão máxima característica (mm)                        | 2,36           | 2,36           |
| Módulo de finura                                           | 2,42           | 2,57           |
| Massa específica real (g/cm <sup>3</sup> )                 | 2,82           | 2,81           |
| Massa unitária do agregado compactado (g/cm <sup>3</sup> ) | 1,78           | 1,78           |
| Massa unitária do agregado solto (g/cm <sup>3</sup> )      | 1,65           | 1,67           |

Fonte: Autoria própria (2023).

Através do Gráfico 5 é possível observar que o método aplicado proporcionou a produção de um tipo de agregado classificado em zona ótima, pois as misturas teórica e experimental do RSG + ARP 2,36 se enquadraram totalmente dentro dos limites da zona ótima. Obtendo, assim, um agregado miúdo viável. Quanto às misturas de RSG + ARP 1,18, considera-se que é também um bom tipo de agregado, tendo em vista que praticamente todas as suas curvas granulométricas (teórica e experimental) estão inseridas na zona ótima, saindo apenas na faixa de abertura da peneira 2,36 mm.

Gráfico 5 – Curvas granulométricas das misturas teóricas e experimentais



Fonte: Autoria própria (2023).

Diante dos resultados obtidos, determinou-se que três argamassas alternativas com composições e porcentagens diferentes de materiais em substituição ao agregado miúdo convencional (areia) e uma argamassa convencional (referência) seriam produzidas e analisadas. Sendo elas: 88% de resíduo de scheelita grosso e 12% de areia quartzosa retida na peneira de 1,18 mm (RSG + ARP 1,18); 87% de resíduo de scheelita grosso e 13% de areia quartzosa retida na peneira de 2,36 mm (RSG + ARP 2,36); 100% resíduo de scheelita grosso (100% RSG) e a argamassa de referência composta por 100% de areia quartzosa (100% AQ (REF)).

#### 4.7 Definição do traço

Conhecida a massa específica real e a massa específica unitária no estado compactado dos materiais utilizados como agregado miúdo e aplicando-as nas equações propostas pelo método de dosagem de Santos *et al.* (2018), os traços iniciais para os quatro tipos de argamassas foram definidos em percentual, massa e volume, como mostra a Tabela 9.

Tabela 9 – Traços básicos dos quatro tipos de argamassas de revestimento

| Traço                        | Unidade | Cimento | Agregado | Água  |
|------------------------------|---------|---------|----------|-------|
| 100% RSG                     | (%)     | 23,19   | 61,81    | 15,00 |
|                              | (l)     | 1,00    | 2,67     | 0,65  |
|                              | (kg)    | 1,00    | 4,58     | 0,64  |
| 88% RSG<br>+<br>12% ARP 1,18 | (%)     | 21,84   | 63,16    | 15,00 |
|                              | (l)     | 1,00    | 2,89     | 0,69  |
|                              | (kg)    | 1,00    | 5,09     | 0,68  |
| 87% RSG<br>+<br>13% ARP 2,36 | (%)     | 21,51   | 63,49    | 15,00 |
|                              | (l)     | 1,00    | 2,95     | 0,70  |
|                              | (kg)    | 1,00    | 5,20     | 0,69  |
| 100% AQ (REF)                | (%)     | 23,49   | 61,51    | 15,00 |
|                              | (l)     | 1,00    | 2,62     | 0,64  |
|                              | (kg)    | 1,00    | 4,11     | 0,63  |

Fonte: Autoria própria (2023).

Analisando a Tabela 9 e buscando definir um traço que seja facilmente manipulado nos canteiros de obras, percebe-se que os traços em volume obtidos para os quatro tipos de argamassas são todos iguais a 1:3 (cimento:agregado miúdo) quando os valores são arredondados para um número inteiro. Mostrando que embora todas as argamassas analisadas sejam compostas por agregados miúdos diferentes, os valores das massas específicas reais e unitárias desses agregados são próximos, convergindo através das formulações para uma mesma proporção de materiais em volume. Definido assim, a quantidade de materiais que constituem a argamassa em função do tipo de agregado utilizado e não de forma arbitrária.

Portanto, para os quatro tipos de argamassas de revestimento adotou-se o traço com proporção em volume de 1:3 (cimento:agregado miúdo). A quantidade de água foi ajustada

durante o processo de produção das argamassas para que todas apresentassem uma consistência de  $260 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$ , conforme recomenda a ABNT NBR 16541 (2016b).

O traço 1:3 (cimento:agregado miúdo) é bastante utilizado na construção civil para a produção de argamassas convencionais, por ser considerado uma boa relação aglomerante-agregado. O que mostra que as argamassas de revestimento alternativas consideradas nesta pesquisa, estão sendo produzidas com proporção de materiais capazes de apresentar uma relação aglomerante-agregado boa e condizente com as argamassas convencionais. Vale salientar que é um traço comumente utilizado nos canteiros de obra da região.

O Quadro 2 apresenta uma síntese de vários trabalhos científicos desenvolvidos com argamassas produzidas com diversos resíduos e traço em volume de 1:3 (cimento:agregado miúdo).

Quadro 2 – Traços 1:3 (em volume) encontrados na literatura

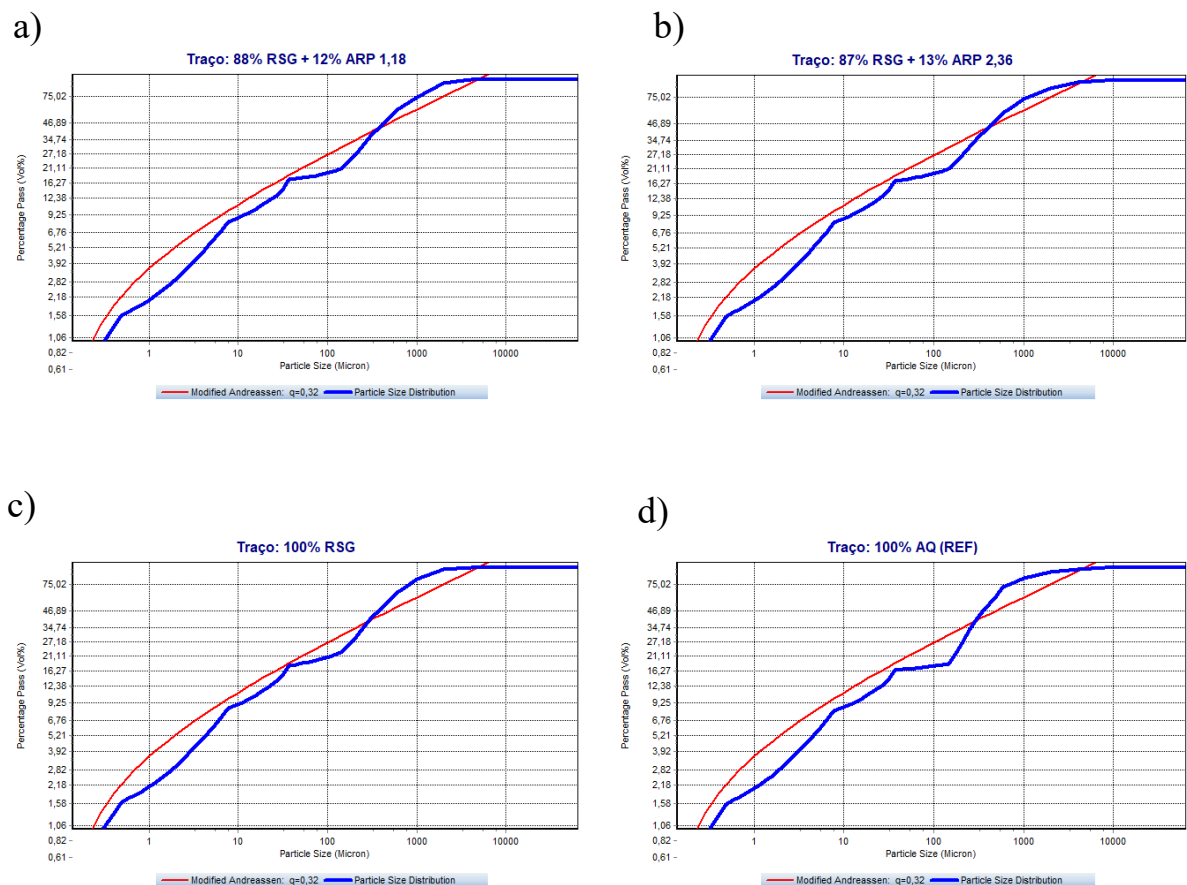
| <b>Autores</b>                  | <b>Finalidade do estudo</b>   | <b>Resíduos empregados</b>                       | <b>Traço em volume</b> |
|---------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------|
| Medeiros (2016)                 | Argamassa de revestimento     | Scheelita                                        | 1:3<br>1:1:6           |
| Tokarski (2017)                 | Argamassa de revestimento     | Areia de britagem de rocha calcária              | 1:3                    |
| Couto <i>et al.</i> (2018)      | Argamassa de cimento Portland | Cinza de madeira de eucalipto                    | 1:3                    |
| Menezes <i>et al.</i> (2018)    | Argamassa de revestimento     | EVA proveniente de fábrica calçadista            | 1:3                    |
| Souza (2019)                    | Argamassas de assentamento    | Scheelita e manipueira                           | 1:3<br>1:1:6           |
| Mendes <i>et al.</i> (2019)     | Argamassas de revestimento    | Rejeitos de minério de ferro e quartzito friável | 1:3<br>1:1:6<br>1:2:9  |
| Macedo (2021)                   | Argamassas de revestimento    | Scheelita e pó de pedra                          | 1:3                    |
| Nascimento <i>et al.</i> (2021) | Argamassa alternativa         | Scheelita                                        | 1:3                    |

Fontes: Medeiros (2016), Tokarski (2017), Couto *et al.* (2018), Menezes *et al.* (2018), Souza (2019), Mendes *et al.* (2019), Macedo (2021) e Nascimento *et al.* (2021).

#### 4.8 Análise do empacotamento das partículas

O *software* EMMA Mix Analyzer, foi utilizado para verificar o empacotamento das partículas das misturas de materiais que constituem as argamassas de revestimento estudadas. Esse *software* apresenta graficamente o empacotamento ideal das partículas (linha vermelha) segundo o método de Andreassen Modificado e o empacotamento real das partículas (linha azul) que compõem os traços. O Gráfico 6 apresenta as curvas de empacotamento, obtidas por esse *software* de simulação computacional, dos quatro tipos de argamassas de revestimento. A Tabela 10 exhibe a área entre as curvas de empacotamento ideal e real dos traços.

Gráfico 6 – Curvas de empacotamento: 88% RSG + 12% ARP 1,18 (a); 87% RSG + 13% ARP 2,36 (b); 100% RSG (c) e 100% AQ (REF) (d)



Fonte: Autoria própria (2023).

Tabela 10 – Valores da área entre as curvas de empacotamento ideal e real

| <b>Traço</b>           | <b>Área entre as curvas de empacotamento ideal e real (u. a)</b> |
|------------------------|------------------------------------------------------------------|
| 88% RSG + 12% ARP 1,18 | 48459,12                                                         |
| 87% RSG + 13% ARP 2,36 | 33058,46                                                         |
| 100% RSG               | 59484,46                                                         |
| 100% AQ (REF)          | 55669,28                                                         |

Fonte: Autoria própria (2023).

As curvas que apresentam um melhor ajuste com o empacotamento ideal de partículas indicado pelo *software* são as dos traços 88% RSG + 12% ARP 1,18 (Gráfico 6a) e 87% RSG + 13% ARP 2,36 (Gráfico 6b), sendo as misturas com maior fator de empacotamento. Estando mais próximas do empacotamento ideal do que a do traço de referência, ou seja, de 100% AQ (Gráfico 6d). O que era esperado, por serem traços constituídos de agregados miúdos obtidos por meio de compatibilização granulométrica.

Ressalta-se que a mistura do RSG + ARP 2,36, que apresentou o melhor ajuste dentre as demais, é composta por um agregado miúdo classificado em zona ótima, possuindo uma curva granulométrica bem próxima à curva ótima média, como pode ser observado no Gráfico 5.

#### 4.9 Caracterização das argamassas de revestimento no estado fresco

##### 4.9.1 Índice de consistência e quantidade de água

Por meio do ensaio de determinação do índice de consistência foi possível obter a quantidade de água utilizada em cada traço. Considerando que cada tipo de argamassa produzida deve apresentar um índice de consistência de  $260 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$ , conforme recomenda a ABNT NBR 16541 (2016b). A Tabela 11 apresenta as relações água/materiais secos utilizadas na produção das argamassas.

Tabela 11 – Relação água/materiais secos utilizada para cada tipo de argamassa

| <b>Argamassa</b> | <b>Relação<br/>água/materiais secos</b> |
|------------------|-----------------------------------------|
| RSG + ARP 1,18   | 0,144                                   |
| RSG + ARP 2,36   | 0,136                                   |
| 100% RSG         | 0,152                                   |
| 100% AQ (REF)    | 0,164                                   |

Fonte: Autoria própria (2023).

Observa-se que a argamassa 100% AQ (REF), ou seja, a argamassa de referência constituída por 100% de areia quartzosa, para obter o índice de consistência de  $260 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$  foi necessária uma maior quantidade de água, apresentando assim a maior relação água/materiais secos, quando comparada com as argamassas constituídas com resíduo de scheelita grosso.

Os traços constituídos pelas misturas de RSG + ARP 1,18 e RSG + ARP 2,36 obtidas por meio da compatibilização granulométrica apresentaram menores relação água/materiais secos. Mostrando que esse processo proporcionou um melhor empacotamento, ajuste entre as partículas dos materiais utilizados como agregados miúdos, acarretando em redução da quantidade de água utilizada na mistura desses tipos de argamassas. Sendo também a consistência da argamassa influenciada pela natureza dos materiais.

Segundo Macedo (2021) diversos fatores influenciam em uma menor demanda de água para a argamassa com incorporação do resíduo de scheelita grosso, entre eles: um bom empacotamento e distribuição granulométrica e as características inerentes à composição química e morfológica do RSG.

Em vários estudos encontrados na literatura (Macedo, 2021; Medeiros, 2016; Souza, 2019; Souza *et al.*, 2023) as argamassas com incorporação de resíduo de scheelita grosso também requereram uma menor quantidade de água, ou seja, apresentaram uma menor relação água/materiais secos, para um índice de consistência fixo, quando comparadas as argamassas convencionais constituídas por areia natural.

#### 4.9.2 Densidade de massa no estado fresco e teor de ar incorporado

A Tabela 12 apresenta os resultados dos ensaios de densidade de massa e do teor de ar incorporado nas argamassas para revestimento no estado fresco analisadas nesta pesquisa.

Tabela 12 – Densidade de massa e teor de ar incorporado nas argamassas no estado fresco

| Argamassa      | Densidade de massa<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Teor de ar incorporado<br>(%) |
|----------------|--------------------------------------------|-------------------------------|
| RSG + ARP 1,18 | 2178                                       | 6                             |
| RSG + ARP 2,36 | 2244                                       | 4                             |
| 100% RSG       | 2203                                       | 4                             |
| 100% AQ (REF)  | 2102                                       | 2                             |

Fonte: Autoria própria (2023).

As argamassas que contém o resíduo de scheelita foram as que apresentaram as maiores densidades de massa no estado fresco. Algo esperado pelo fato do resíduo de scheelita grosso possuir uma massa específica maior que a areia quartzosa. Esse comportamento também foi relatado em diversos trabalhos científicos (Macedo, 2021; Medeiros, 2016; Souza, 2019; Souza *et al.*, 2023).

A argamassa composta por RSG + ARP 2,36 se destacou por apresentar a maior densidade de massa no estado fresco, como visto na análise realizada pelo *software* EMMA Mix Analyzer é a mistura com maior fator de empacotamento, influenciando no resultado obtido.

Segundo a ABNT NBR 13281-1 (2023) todas as argamassas com incorporação de RSG e a argamassa produzida com areia quartzosa natural (referência) se enquadram na classe DF4 ( $DF \geq 2000 \text{ kg/m}^3$ ) em relação à densidade de massa no estado fresco.

Quanto ao teor de ar incorporado, observa-se na Tabela 12, que a argamassa de referência apresentou o menor teor. Justificando provavelmente o fato desse mesmo tipo de argamassa solicitar uma maior demanda de água para um índice de consistência fixo quando comparada com as demais. É interessante ressaltar que a sua menor densidade de massa, não está relacionada ao teor de ar incorporado e sim a massa específica do agregado que a constitui (areia quartzosa natural) que é inferior à do RSG, como relatado anteriormente.

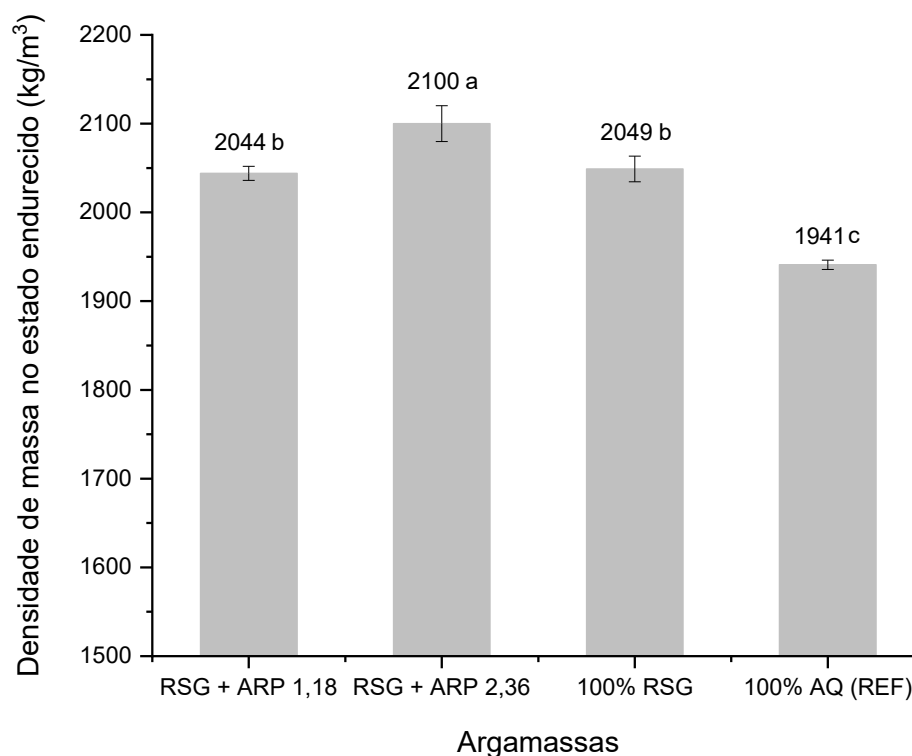
#### 4.10 Caracterização das argamassas de revestimento no estado endurecido

##### 4.10.1 Densidade de massa aparente no estado endurecido

Os resultados obtidos no ensaio de determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido aos 28 dias são exibidos no Gráfico 7. As argamassas com incorporação do

resíduo de scheelita grosso no estado endurecido possuem as maiores densidades de massa aparente quando comparadas com a argamassa de referência. Tal fato também foi observado por Macedo (2021) e Souza *et al.* (2023) em suas pesquisas.

Gráfico 7 – Densidade de massa aparente no estado endurecido das argamassas produzidas com teste comparativo de Tukey 5%



Fonte: Autoria própria (2024).

As maiores densidades de massa aparente no estado endurecido nas argamassas constituídas de RSG estão relacionados a massa específica do resíduo de scheelita grosso ser superior à massa específica da areia quartzosa natural e ao empacotamento das partículas.

Conforme o teste de Tukey com 95% de confiança, as médias da densidade de massa aparente no estado endurecido das argamassas compostas por RSG + ARP 1,18 e 100% RSG não diferem entre si, ou seja, não houve variação estatística significativa entre elas.

Quanto a classificação referente ao requisito de densidade de massa no estado endurecido estabelecida pela ABNT NBR 13281-1 (2023), os quatro tipos de argamassas são pertencentes a classe DE4 ( $DE \geq 1800 \text{ kg/m}^3$ ).

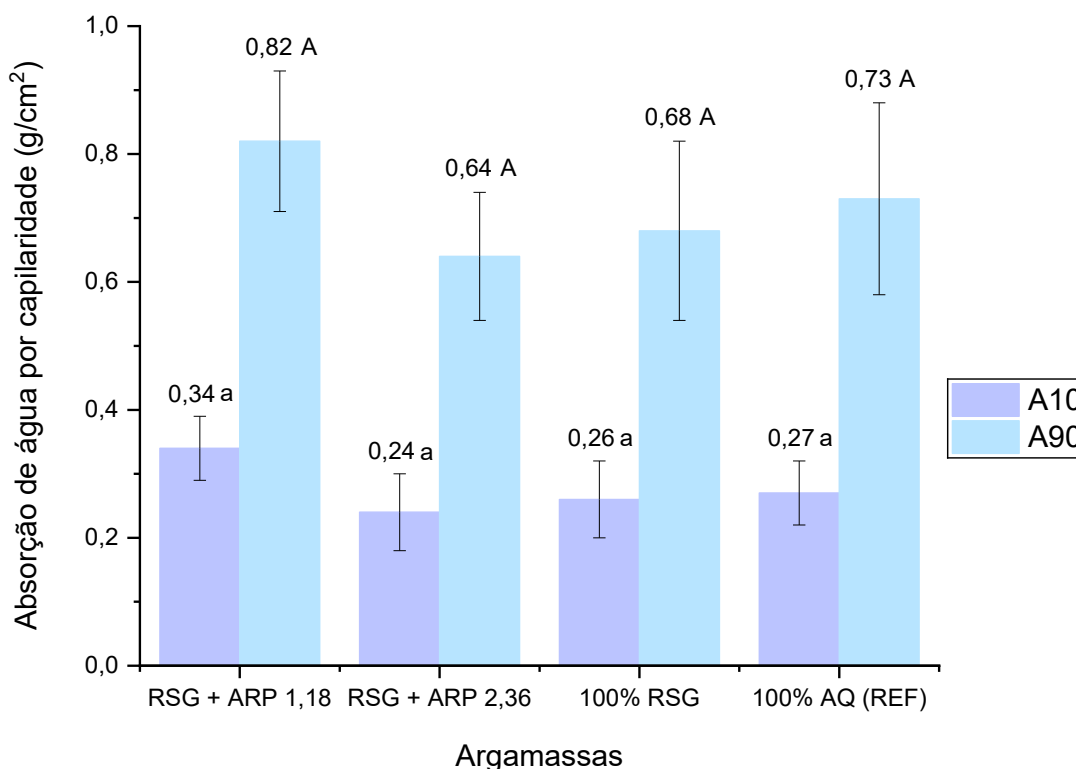
Nota-se que as densidades de massa aparente no estado endurecido das argamassas estudadas são menores que as densidades de massa no estado fresco, devido parte da água de amassamento ser evaporada durante o processo de cura.

#### 4.10.2 Absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade

Os resultados dos ensaios de absorção de água por capilaridade em 10 minutos (A10) e 90 minutos (A90), bem como do coeficiente de capilaridade são apresentados no Gráfico 8 e no Gráfico 9, respectivamente.

Observa-se, graficamente (Gráfico 8) que a argamassa constituída por RSG + ARP 2,36 apresentou a menor absorção de água por capilaridade em 10 min e 90 min. Entretanto, a análise estatística conforme o teste de Tukey com 95% de confiança, demonstra que as médias da absorção de água por capilaridade em A10 e A90 para cada tipo de argamassa não diferem entre si estatisticamente.

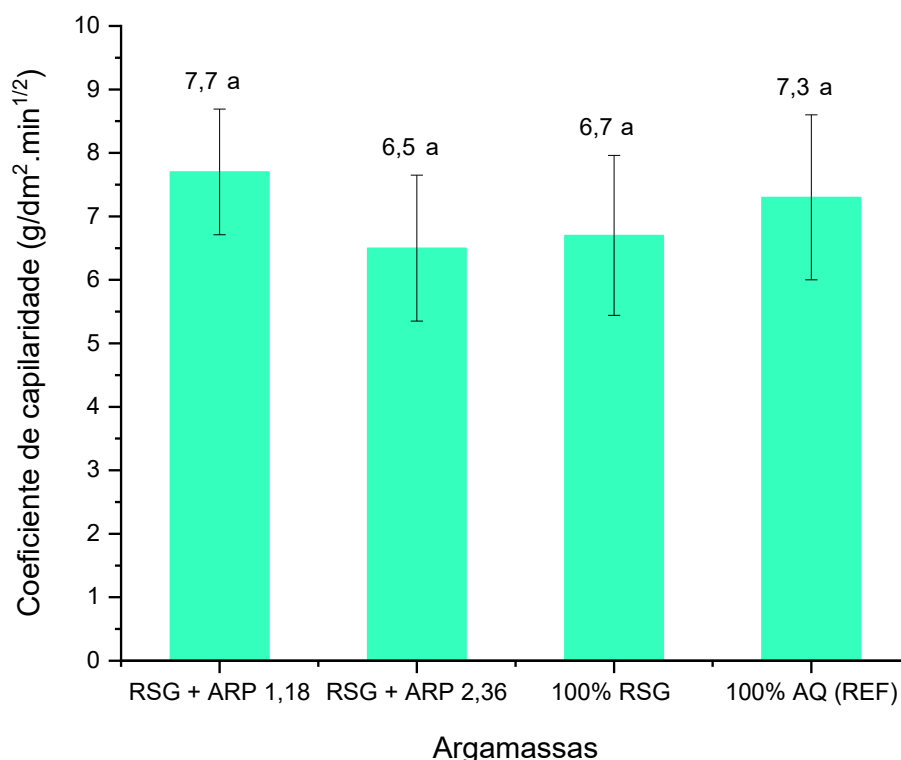
Gráfico 8 – Absorção de água por capilaridade em 10 min e 90 min das argamassas produzidas com teste comparativo de Tukey 5%



Fonte: Autoria própria (2024).

No Gráfico 9 é possível visualizar que os valores dos coeficientes de capilaridade dos quatro tipos de argamassas são numericamente próximos. Estatisticamente, também todos iguais, conforme o teste de Tukey com 95% de confiança.

Gráfico 9 – Coeficiente de capilaridade das argamassas produzidas com teste comparativo de Tukey 5%



Fonte: Autoria própria (2024).

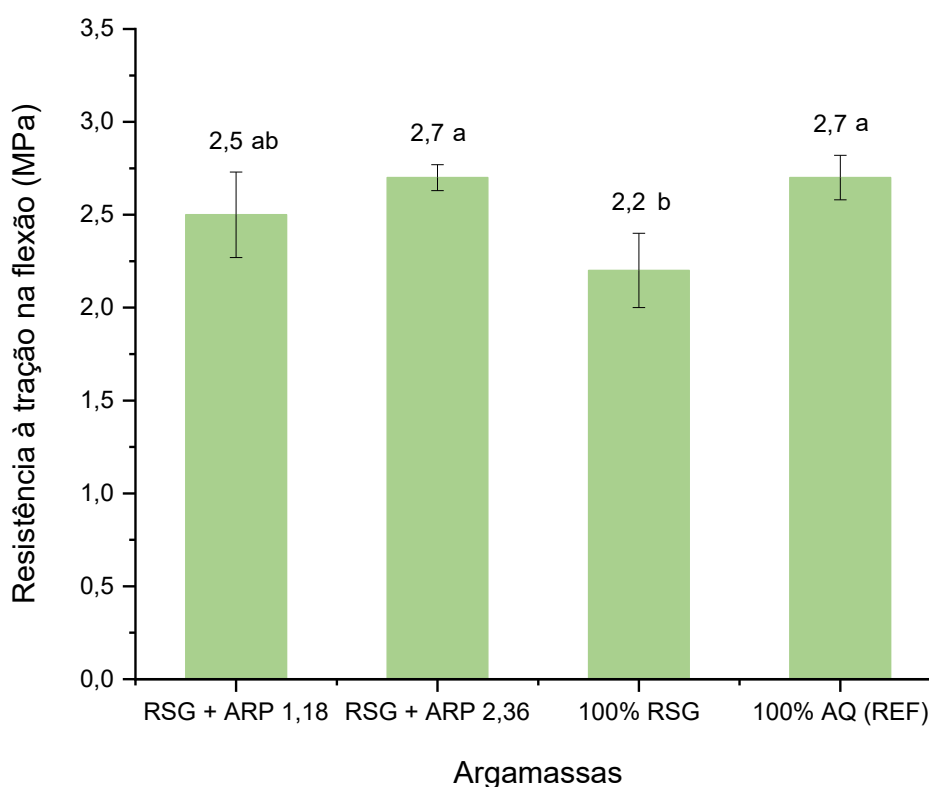
Embora os resultados sejam iguais estatisticamente, em termos numéricos, o menor coeficiente de capilaridade obtido foi 6,5 g/dm<sup>2</sup>.min<sup>1/2</sup> da argamassa constituída por RSG + ARP 2,36. Esse resultado era esperado, por ser o traço que possui o maior fator de empacotamento. Sendo a curva dessa mistura aquela que apresenta o melhor ajuste com o empacotamento ideal de partículas indicado no Gráfico 6.

Através dos resultados obtidos, foi possível verificar que a incorporação do resíduo de scheelita grosso nas argamassas de revestimento não interferiu de forma significativa na absorção de água por capilaridade e no coeficiente de capilaridade. As argamassas constituídas por esses resíduos apresentaram comportamento semelhante à argamassa composta apenas por areia quartzosa, ou seja, a argamassa convencional.

#### 4.10.3 Resistência à tração na flexão

O Gráfico 10 demonstra os resultados do ensaio de resistência à tração na flexão realizado aos 28 dias de idade dos corpos de prova. As argamassas com incorporação do resíduo de scheelita grosso apresentam resistências à tração na flexão próximas à argamassa constituída por areia natural como agregado miúdo. A resistência à tração na flexão das argamassas compostas por RSG + ARP 1,18 e 100% RSG, são um pouco inferiores à da argamassa convencional (100% AQ (REF)), no entanto, a produzida com RSG + ARP 2,36 apresentou resistência igual à da argamassa de referência.

Gráfico 10 – Resistência à tração na flexão das argamassas produzidas com teste comparativo de Tukey 5%



Fonte: Autoria própria (2024).

O teste de Tukey com 95% de confiança constata que existe variação estatística significativa entre os valores médios da resistência à tração na flexão das argamassas 100% RSG e 100% AQ (REF). Sendo iguais estatisticamente os das argamassas RSG + ARP 1,18,

RSG + ARP 2,36 e 100% AQ (REF). Também não diferem entre si as médias de 100% RSG e RSG + ARP 1,18.

Os resultados médios da resistência à tração na flexão obtidos, não apresentam o mesmo comportamento descrito por Macedo (2021) e Medeiros (2016), em relação às argamassas com incorporação do resíduo de scheelita grosso possuírem resistências à tração na flexão superiores as das argamassas de referência aos 28 dias.

Entretanto, todas as argamassas de revestimento constituídas de RSG analisadas nesta pesquisa possuem resistência à tração na flexão superior à das argamassas de revestimento com resíduo de scheelita grosso estudadas por Medeiros (2016).

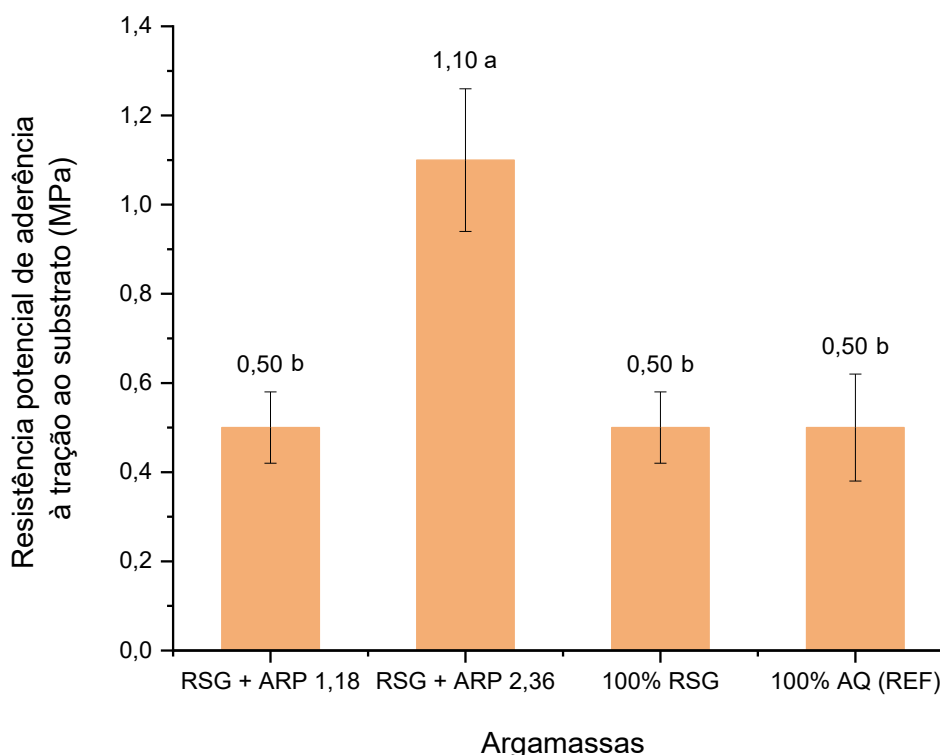
Conforme a ABNT NBR 13281-1 (2023) os quatro tipos de argamassas produzidas pertencem à classe de resistência à tração na flexão R3 ( $1,5 \text{ MPa} \leq R_f < 3,0 \text{ MPa}$ ). Encontram-se em uma classe significativa, são bons resultados, o que é algo interessante, pois a resistência à tração na flexão influencia no desempenho e durabilidade das argamassas.

#### 4.10.4 Resistência potencial de aderência à tração ao substrato e superficial

Os resultados dos ensaios de resistência potencial de aderência à tração ao substrato e superficial realizados nos quatro tipos de argamassas consideradas nessa pesquisa, aos 28 dias de idade, estão expostos no Gráfico 11 e no Gráfico 12, respectivamente.

As argamassas constituídas por RSG + ARP 1,18 e 100% RSG apresentaram resistência potencial média de aderência à tração ao substrato igual à argamassa convencional (100% AQ (REF)). A argamassa de RSG + ARP 2,36 se destacou por obter um elevado valor de resistência potencial de aderência à tração ao substrato, diferindo estatisticamente das demais, conforme o teste de Tukey com 95% de confiança. Como pode ser observado no Gráfico 11.

Gráfico 11 – Resistência potencial de aderência à tração ao substrato das argamassas produzidas com teste comparativo de Tukey 5%



Fonte: Autoria própria (2024).

Segundo a ABNT NBR 13281-1 (2023) os quatro tipos de argamassas de revestimento produzidas apresentaram resistência potencial de aderência à tração ao substrato ( $R_i$ ) que se enquadram tanto na classe RA1 ( $R_i \geq 0,20$  MPa) como na classe RA2 ( $R_i \geq 0,30$  MPa), ou seja, podendo ser utilizadas como revestimento interno recomendado para aplicação de pintura e/ou textura e peças cerâmicas, como também para revestimento externo.

Medeiros *et al.* (2019) ao analisarem argamassas mistas (cimento e hidróxido de cálcio) com substituição de 100% da areia natural pelo resíduo de scheelita como agregado miúdo, observaram haver uma similaridade entre os valores médios obtidos nos ensaios de aderência à tração da argamassa constituída por resíduo de scheelita e a composta apenas por areia natural, sendo valores bem próximos, 0,23 MPa e 0,22 MPa, respectivamente.

Macedo (2021) obteve para a argamassa constituída de resíduo de scheelita grosso e pó de pedra como agregado miúdo uma resistência de aderência à tração igual a 0,38 MPa e para a argamassa produzida com areia natural (argamassa de referência) 0,42 MPa, ou seja, resistências também próximas.

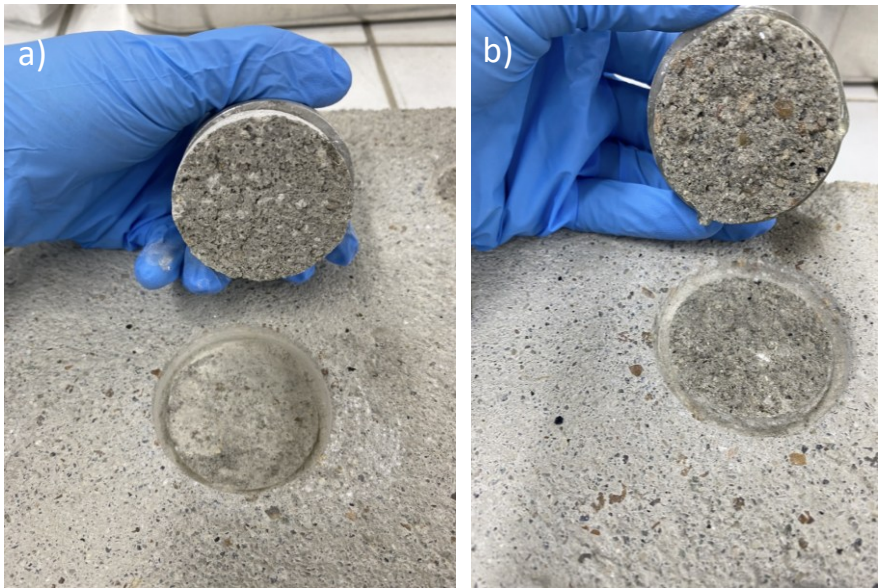
A Tabela 13 mostra as formas de ruptura e as porcentagens de ocorrência das argamassas no ensaio de resistência potencial de aderência à tração ao substrato. É possível observar que as formas de ruptura B (ruptura na interface substrato/argamassa) e C (ruptura na argamassa) foram as que apresentaram as maiores porcentagens de ocorrência. As Figuras 24a e 24b demonstram esses dois tipos de rupturas ocorridos durante a realização do ensaio.

Tabela 13 – Formas de ruptura e porcentagens de ocorrência das argamassas no ensaio de resistência potencial de aderência à tração ao substrato

| Argamassas     | Resistência potencial média de aderência à tração ao substrato (MPa) | Formas de ruptura e porcentagens de ocorrência (%) |    |    |    |   |
|----------------|----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|----|----|----|---|
|                |                                                                      | A                                                  | B  | C  | D  | E |
| RSG + ARP 1,18 | 0,50                                                                 | 20                                                 | 0  | 60 | 20 | 0 |
| RSG + ARP 2,36 | 1,10                                                                 | 0                                                  | 22 | 67 | 11 | 0 |
| 100% RSG       | 0,50                                                                 | 0                                                  | 60 | 0  | 40 | 0 |
| 100% AQ (REF)  | 0,50                                                                 | 0                                                  | 50 | 50 | 0  | 0 |

Fonte: Autoria própria (2024).  
Legenda: A - Ruptura no substrato; B - Ruptura na interface substrato/argamassa; C - Ruptura na argamassa; D - Ruptura na interface argamassa/cola; E - Ruptura na interface cola/pastilha.

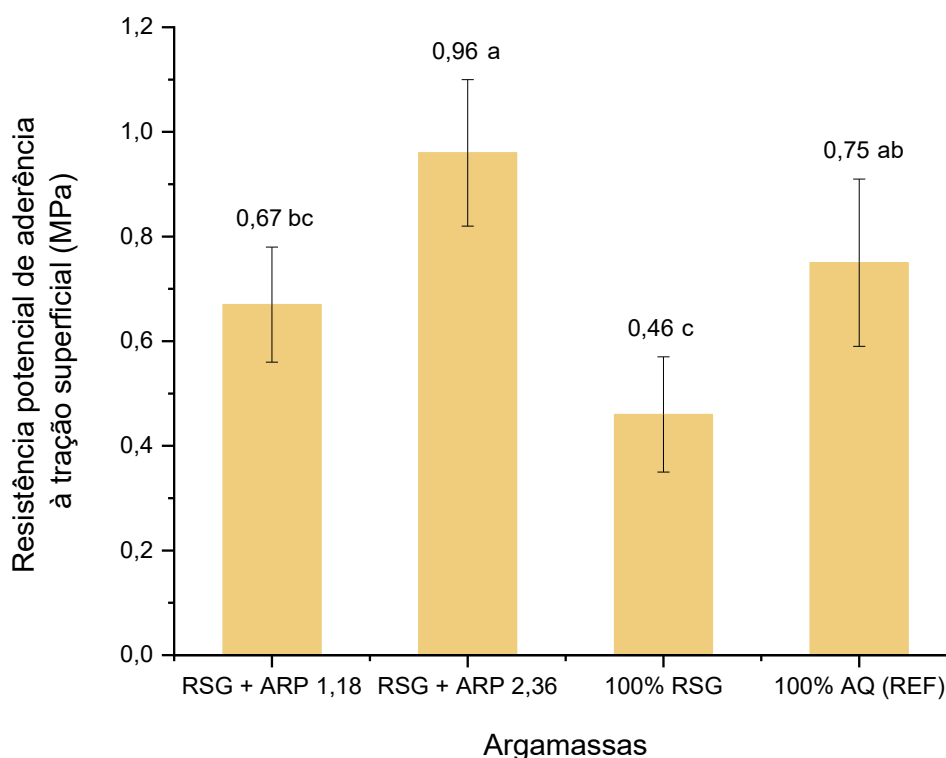
Figura 24 – Rupturas de maior ocorrência no ensaio de resistência de aderência à tração ao substrato: ruptura na interface substrato/argamassa (a) e ruptura na argamassa (b)



Fonte: Arquivos da autora (2024).

Em relação à resistência potencial de aderência à tração superficial aos 28 dias, por meio do Gráfico 12 é possível observar graficamente que a argamassa produzida com a mistura de RSG + ARP 2,36 como agregado miúdo possui a maior resistência potencial de aderência à tração superficial e a que apresenta a menor é a argamassa composta por 100% RSG.

Gráfico 12 – Resistência potencial de aderência à tração superficial das argamassas produzidas com teste comparativo de Tukey 5%



Fonte: Autoria própria (2024).

Conforme o teste de Tukey com 95% de confiança, não há variação estatística significativa entre a resistência potencial de aderência à tração superficial da argamassa de RSG + ARP 2,36 e 100% AQ (REF). Assim como, não há entre 100% AQ (REF) e RSG + ARP 1,18. Quanto a argamassa de 100% RSG, difere estatisticamente dos valores obtidos em 100% AQ (REF) e RSG + ARP 2,36, sendo igual estatisticamente apenas a RSG + ARP 1,18.

Segundo a ABNT NBR 13281-1 (2023) em relação à resistência potencial à tração superficial ( $R_i$ ) as argamassas RSG + ARP 1,18, RSG + ARP 2,36 e 100% AQ (REF) pertencem às classes RS1 ( $R_i \geq 0,20$  MPa), RS2 ( $R_i \geq 0,30$  MPa) e RS3 ( $R_i \geq 0,50$  MPa), podendo ser utilizadas como revestimento interno e externo com aplicação de pintura e/ou

textura e placas cerâmicas. A argamassa 100% RSG é classificada apenas como RS1 ( $R_i \geq 0,20$  MPa) e RS2 ( $R_i \geq 0,30$  MPa), indicada ao uso como revestimento interno permitindo o emprego de pintura e/ou textura e peças cerâmicas, e para revestimento externo quando se destina à aplicação somente de pintura e/ou textura.

Segundo Carasek (2017) em argamassas trabalháveis, quanto maior o módulo de finura das areias, ou seja, do agregado miúdo, maior será a resistência de aderência das argamassas. Observa-se que realmente, a argamassa produzida de RSG + ARP 2,36 obteve os maiores resultados de resistência de aderência potencial à tração em relação às demais. Através do método de compatibilização granulométrica foi possível obter esse agregado miúdo classificado em zona ótima com uma boa distribuição granulométrica e maior módulo de finura dentre os agregados miúdos utilizados.

As formas de ruptura e as porcentagens de ocorrência no ensaio de resistência potencial de aderência à tração superficial são apresentadas na Tabela 14. Durante o ensaio, ocorreu nas argamassas, ruptura no interior do revestimento (A) e ruptura da superfície do revestimento (B). As Figuras 25a e 25b apresentam essas duas formas de ruptura ocorridas.

Tabela 14 – Formas de ruptura e porcentagens de ocorrência das argamassas no ensaio de resistência potencial de aderência à tração superficial

| Argamassas     | Resistência potencial média de aderência à tração superficial (MPa) | Formas de ruptura e porcentagens de ocorrência (%) |     |   |   |
|----------------|---------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-----|---|---|
|                |                                                                     | A                                                  | B   | C | D |
| RSG + ARP 1,18 | 0,67                                                                | 50                                                 | 50  | 0 | 0 |
| RSG + ARP 2,36 | 0,96                                                                | 50                                                 | 50  | 0 | 0 |
| 100% RSG       | 0,46                                                                | 0                                                  | 100 | 0 | 0 |
| 100% AQ (REF)  | 0,75                                                                | 0                                                  | 100 | 0 | 0 |

Fonte: Autoria própria (2024).

Legenda: A - Ruptura no interior do revestimento; B - Ruptura da superfície do revestimento; C - Ruptura na interface cola/revestimento; D - Ruptura na interface pastilha metálica/cola.

Figura 25 – Rupturas ocorridas no ensaio de resistência de aderência à tração superficial: ruptura no interior do revestimento (a) e ruptura da superfície do revestimento (b)



Fonte: Arquivos da autora (2024).

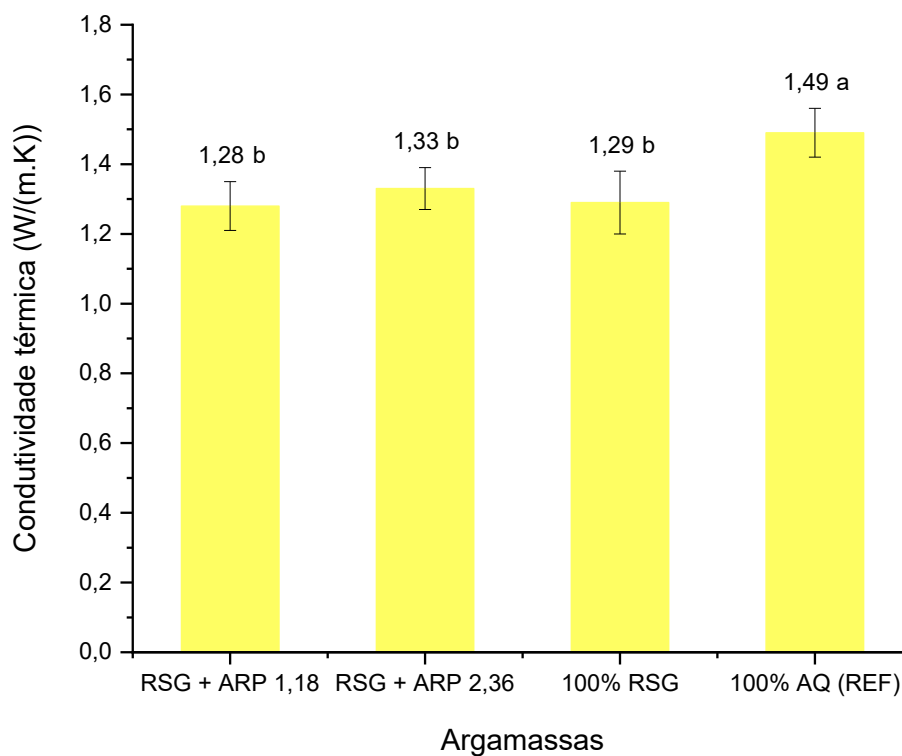
## 4.11 Análise térmica das argamassas de revestimento

### 4.11.1 Propriedades térmicas

Analisar as propriedades térmicas como condutividade, resistividade, difusividade e capacidade calorífica volumétrica das argamassas de revestimento é bastante importante, pois influenciam no comportamento térmico do ambiente.

O Gráfico 13 mostra a condutividade térmica das argamassas estudadas. Observa-se que a argamassa produzida com areia quartzosa natural (100% AQ (REF)) possui condutividade térmica superior às argamassas constituídas com resíduo de scheelita grosso, diferindo estatisticamente conforme o teste de Tukey com 95% de confiança. As argamassas com incorporação do RSG apresentam condutividades térmicas bem próximas, não diferem entre si, ou seja, estatisticamente são todas iguais.

Gráfico 13 – Condutividade térmica das argamassas produzidas com teste comparativo de Tukey 5%



Fonte: Autoria própria (2024).

O resultado obtido para a condutividade térmica da argamassa de 100% AQ (REF) apresentou um comportamento diferenciado. Geralmente, a condutividade térmica é proporcional a densidade de massa do material, ou seja, materiais com menor densidade possuem menor condutividade térmica. O que não ocorreu com a argamassa de referência. Ela apresentou menor densidade de massa nos estados fresco e endurecido em relação as demais argamassas com RSG, como pode ser observado na Tabela 12 e no Gráfico 7, respectivamente, e uma maior condutividade térmica. Como relatado, essas menores densidades estão relacionadas ao fato da areia quartzosa possuir uma massa específica menor que o resíduo de scheelita grosso. Mostrando que a condutividade térmica não está apenas relacionada à densidade de massa do material, mas a outras propriedades e características.

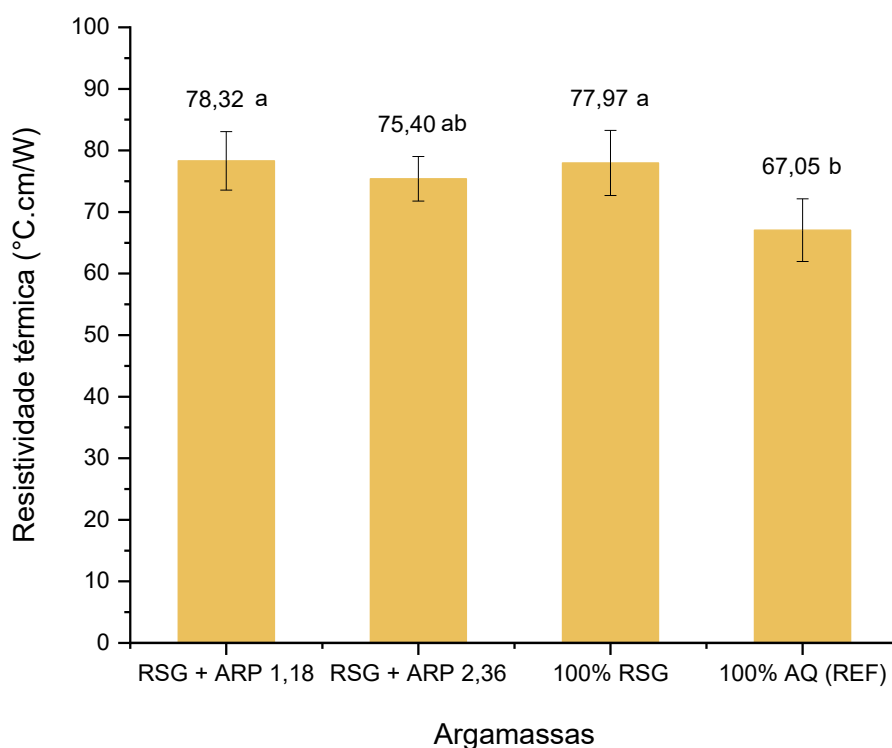
Mendes *et al.* (2019) ao analisarem a condutividade térmica de argamassas de revestimento produzidas com areia de rio, rejeitos de minério de ferro e quartzito friável como agregados, constataram que nesses diferentes tipos de argamassa a condutividade térmica não está relacionada diretamente com a densidade e associada somente com a porosidade absoluta,

mas com à distribuição do tamanho dos poros, quanto maior a quantidade de poros menores ( $< 20 \mu\text{m}$ ), menor é a condutividade térmica obtida.

Como visto na Tabela 12, as argamassas com incorporação do resíduo de scheelita no estado fresco apresentaram teor de ar incorporado superior à argamassa produzida com areia quartzosa natural, o maior teor de finos presentes no resíduo de scheelita grosso, assim como, a compatibilização granulométrica, pode ter propiciado a formação de poros menores, contribuindo para uma menor condutividade térmica em relação à argamassa de referência.

A resistividade térmica é uma propriedade inversamente proporcional a condutividade térmica. Como podem ser observadas no Gráfico 14, as argamassas com incorporação do resíduo de scheelita apresentaram resistividades térmicas superiores à argamassa com areia quartzosa natural, o que era esperado, tendo em vista que elas possuem menores condutividades térmicas em relação à argamassa de referência. Conforme o teste de Tukey com 95% de confiança, não há diferença estatística significativa entre os três tipos de argamassas compostas com RSG. A resistividade térmica da argamassa 100% AQ (REF) difere estatisticamente de RSG + ARP 1,18 e 100% RSG e apresenta interação com RSG + ARP 2,36.

Gráfico 14 – Resistividade térmica das argamassas produzidas com teste comparativo de Tukey 5%

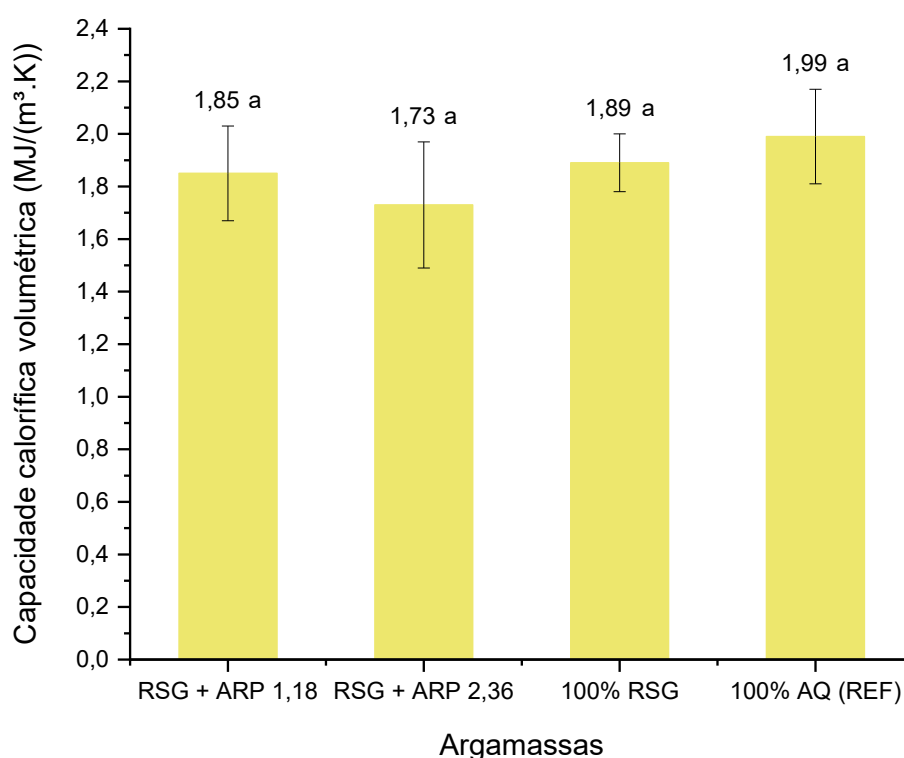


Fonte: Autoria própria (2024).

As argamassas de revestimento constituídas de RSG como apresentam uma baixa condutividade térmica e alta resistividade térmica irão proporcionar uma menor condução de calor nos elementos construtivos, contribuindo positivamente para o desempenho térmico da edificação.

Por meio do Gráfico 15 é possível verificar que a argamassa de referência (100% AQ (REF)) possui a maior capacidade calorífica volumétrica  $1,99 \text{ MJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$  e a RSG + ARP 2,36 a menor capacidade  $1,73 \text{ MJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ . No entanto, analisando estatisticamente, a capacidade calorífica volumétrica das argamassas consideradas constata-se ser todas iguais, não diferem entre si, conforme o teste de Tukey com 95% de confiança.

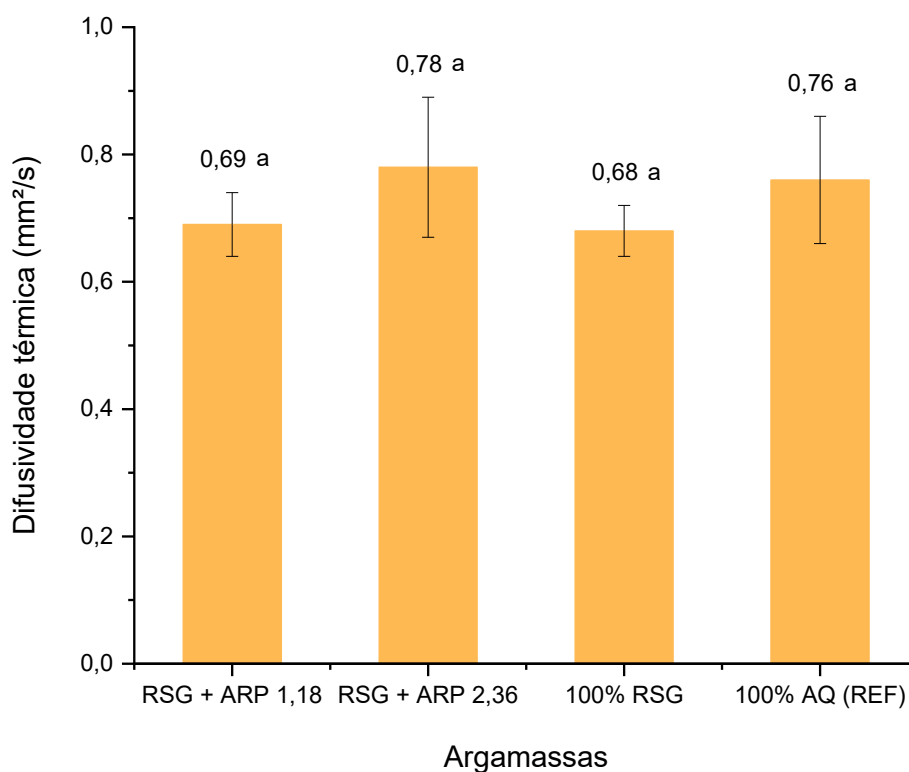
Gráfico 15 – Capacidade calorífica volumétrica das argamassas produzidas com teste comparativo de Tukey 5%



Fonte: Autoria própria (2024).

Para a difusividade térmica, os valores obtidos foram bem próximos para os quatro tipos de argamassas de revestimento analisadas, como mostra o Gráfico 16. Conforme o teste de Tukey com 95% de confiança, a difusividade térmica das argamassas não difere entre si, ou seja, não há variação estatística significativa entre elas, apresentando comportamento semelhante em relação à velocidade com a qual transmitem calor.

Gráfico 16 – Difusividade térmica das argamassas produzidas com teste comparativo de Tukey 5%



Fonte: Autoria própria (2024).

#### 4.11.2 Desempenho térmico

A Tabela 15 apresenta a transmitância térmica e a capacidade térmica de paredes externas idealizadas constituídas por blocos cerâmicos revestidos em ambas as faces com as argamassas de revestimento estudadas. As transmitâncias térmicas obtidas são todas iguais, ou seja, o tipo de argamassa de revestimento não influenciou essa propriedade. Quanto a capacidade térmica observa-se que a parede idealizada revestida com a argamassa de referência (100% AQ (REF)) apresentou a maior capacidade térmica em relação às revestidas com as argamassas com incorporação de resíduo de scheelita grosso.

Tabela 15 – Transmitância térmica e capacidade térmica de paredes externas

| <b>Tipos de argamassas<br/>de revestimento</b> | <b>Transmitância térmica<br/>W/(m<sup>2</sup>.K)</b> | <b>Capacidade térmica<br/>kJ/(m<sup>2</sup>.K)</b> |
|------------------------------------------------|------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| RSG + ARP 1,18                                 | 2,4                                                  | 151                                                |
| RSG + ARP 2,36                                 | 2,4                                                  | 145                                                |
| 100% RSG                                       | 2,4                                                  | 153                                                |
| 100% AQ (REF)                                  | 2,4                                                  | 159                                                |

Fonte: Autoria própria (2024).

Segundo a ABNT NBR 15575-4 (2021b), a transmitância térmica de paredes externas ( $U_{\text{par}}$ ) dos ambientes de permanência prolongada devem ser  $U_{\text{par}} \leq 2,7 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$  para as zonas bioclimáticas 1 e 2 e para as zonas bioclimáticas 3 a 8 se a absorptância à radiação solar da superfície externa da parede ( $\alpha_{\text{par}}$ ) for  $\alpha_{\text{par}} \leq 0,6$  a  $U_{\text{par}} \leq 3,7 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$  e para  $\alpha_{\text{par}} > 0,6$  deve-se considerar  $U_{\text{par}} \leq 2,5 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ . As paredes externas idealizadas revestidas com os quatro tipos de argamassas possuem transmitâncias térmicas inferiores a esses valores de referências, portanto, atendem ao desempenho térmico mínimo nas oito zonas bioclimáticas brasileiras.

A capacidade térmica de paredes externas ( $CT_{\text{par}}$ ) dos ambientes de permanência prolongada deve ser  $CT_{\text{par}} \geq 130 \text{ kJ}/(\text{m}^2.\text{K})$  para as zonas bioclimáticas 1 a 7 e para zona bioclimática 8 não há requisito, segundo a ABNT NBR 15575-4 (2021b). Observa-se, que as paredes externas idealizadas revestidas com os quatro tipos de argamassas considerados, apresentam capacidades térmicas superiores ao valor de referência, atendendo também ao desempenho térmico mínimo quanto a essa propriedade nas oito zonas bioclimáticas brasileiras.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os processos de mineração da scheelita no semiárido potiguar geram resíduos, ocasionando uma série de impactos ambientais negativos. Tendo em vista a necessidade de destinar adequadamente esses resíduos e minimizar a utilização da areia natural como agregado miúdo na confecção de argamassas, foram produzidas e analisada a viabilidade de argamassas de revestimento com incorporação do resíduo da scheelita substituindo de forma parcial e total a areia quartzosa natural.

Os resultados dos ensaios de caracterização física demonstram que o resíduo de scheelita grosso pode ser utilizado como agregado miúdo em argamassas de revestimento. Uma boa parte da sua curva granulométrica se encontra na zona ótima, enquanto a curva granulométrica da areia quartzosa passa ligeiramente dentro dessa zona. Ambos os materiais apresentam uma granulometria próxima, pois os valores dos módulos de finura são praticamente iguais. Possuem também microestrutura e composição química semelhantes. Conclui-se, que o resíduo de scheelita grosso apresenta similaridades com a areia natural.

Através da compatibilização granulométrica foi possível obter misturas com um elevado teor de substituição da areia natural pelo resíduo de scheelita grosso, obtendo assim agregados com curvas granulométricas bem próximas da curva ótima média e módulos de finura da zona ótima. As misturas teórica e experimental de 87% RSG + 13% ARP 2,36 são classificadas em zona ótima, pois suas curvas granulométricas estão totalmente inseridas nessa zona e muito próximas da curva ótima média.

Os traços definidos pelo método de dosagem de Santos *et al.* (2018), para os quatro tipos de argamassas produzidas, foram todos iguais a 1:3 (cimento:agregado miúdo) em volume. Alcançando o objetivo de obter um traço viável para produção convencional, ou seja, que fosse facilmente produzido em obra e mostrando que embora tenha sido um traço obtido em função das características físicas que constituem os materiais é um traço que vem sendo utilizado para a produção de argamassas de revestimento na região, devido 1:3 ser considerada uma boa relação aglomerante-agregado.

Por meio do *software* EMMA Mix Analyzer, constatou-se que o traço constituído por 87% RSG + 13% ARP 2,36 possui o maior fator de empacotamento. A curva de sua mistura proporciona um bom ajuste com o empacotamento ideal de partículas definido pelo *software*. Corroborando com a metodologia de compatibilização granulométrica aplicada.

Quanto às propriedades das argamassas no estado fresco, constatou-se que os três tipos de argamassas com incorporação do resíduo de scheelita grosso demanda de uma menor

quantidade de água em relação à argamassa de referência para um índice de consistência de  $260 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$ . Ressalta-se que o teor de ar incorporado na argamassa de referência foi inferior ao das demais.

Embora as argamassas constituídas com RSG possuam densidades de massa tanto no estado fresco quanto no estado endurecido superiores às densidades da argamassa composta apenas por areia quartzosa, em ambas as propriedades, todas elas se enquadram na mesma classe, conforme a ABNT NBR 13281-1 (2023).

A absorção de água por capilaridade nos tempos de 10 min e 90 min, estatisticamente, não diferiu entre os quatro tipos de argamassas estudadas. Assim como, os valores dos coeficientes de capilaridade que também são estatisticamente todos iguais.

As argamassas com incorporação de resíduo de scheelita grosso apresentam boa resistência à tração na flexão. Conforme a análise estatística realizada as resistências de RSG + ARP 1,18 e RSG + ARP 2,36 são iguais a de 100% AQ (REF). A argamassa de 100% RSG apresentou resistência à tração menor, porém, próxima das demais. Pertencendo todas a mesma classe, segundo a ABNT NBR 13281-1 (2023).

A argamassa constituída por RSG + ARP 2,36 obteve a maior resistência potencial de aderência à tração ao substrato. E as argamassas RSG + ARP 1,18 e 100% RSG apresentaram resistências iguais à da argamassa de referência (100% AQ (REF)). Podendo todas elas serem utilizadas como revestimento interno recomendado para aplicação de pintura e/ou textura e peças cerâmicas, como também para revestimento externo, conforme a ABNT NBR 13281-1 (2023).

Em relação à resistência potencial de aderência à tração superficial, a argamassa 100% RSG apresentou a menor resistência, sendo indicada pela ABNT NBR 13281-1 (2023) ao uso como revestimento interno permitindo o emprego de pintura e/ou textura e peças cerâmicas, e para revestimento externo quando se destina à aplicação somente de pintura e/ou textura. As demais argamassas por apresentarem uma maior resistência podem ser utilizadas como revestimento interno e externo com aplicação de pintura e/ou textura e placas cerâmicas, segundo a ABNT NBR 13281-1 (2023). A argamassa constituída por RSG + ARP 2,36 apresentou a maior resistência, considerada estatisticamente igual à argamassa de referência.

Analisando termicamente as argamassas de revestimento, observa-se que todas as argamassas com incorporação do resíduo de scheelita grosso apresentam condutividades térmicas iguais estatisticamente e inferiores à argamassa constituída apenas por areia quartzosa e maiores resistividades térmicas. Algo positivo, pois permitem uma menor condução de calor. Em relação à capacidade calorífica volumétrica e difusividade térmica,

analisando-as estatisticamente, observa-se que os valores obtidos para os quatro tipos de argamassa não diferem entre si, ou seja, assumem comportamento semelhante.

Em relação à transmitância térmica e a capacidade térmica das paredes externas idealizadas de blocos cerâmicos revestidos em ambas as faces com as argamassas de revestimento estudadas, obteve-se transmitância térmica igual em todos os tipos de argamassa empregada e capacidade térmica com valores próximos, obtendo a maior capacidade térmica a parede revestida com a argamassa de 100% AQ (REF). Os quatro tipos de paredes externas consideradas, atendem ao desempenho térmico mínimo de sistemas de vedações verticais externas para ambientes de permanência prolongada de unidades habitacionais nas oito zonas bioclimáticas brasileiras, conforme a ABNT NBR 15575-4 (2021b).

As argamassas com incorporação do resíduo de scheelita grosso, analisadas nesta pesquisa, podem ser utilizadas como argamassa de revestimento conforme as propriedades consideradas, pois suas propriedades mecânicas e térmicas são semelhantes às propriedades de uma argamassa constituídas com areia quartzosa, ou seja, a argamassa convencional. A argamassa de RSG + ARP 2,36 se destacou por apresentar boa resistência à tração na flexão e a resistência potencial de aderência à tração ao substrato e superficial. Mostrando que a utilização de agregados miúdos bem empacotados, que se enquadrem totalmente na zona ótima, influencia positivamente nas propriedades das argamassas de revestimento.

Seria interessante utilizar essas argamassas de revestimento compostas por resíduo de scheelita estudadas nesta pesquisa em construções de casas populares na região das minas. Pois, possuem propriedades viáveis, o uso do RSG reduz o consumo de água na produção das argamassas e o custo dos resíduos pode ser inferior ao da areia quartzosa. Proporcionando economia e qualidade similar à das argamassas convencionais. Ressaltando, nesta perspectiva, que a aplicação do RSG pode ser rentável para as mineradoras.

A utilização dessas argamassas alternativas para revestimento contribuirá significativamente com a redução de impactos ambientais negativos proporcionados pelo descarte de toneladas de resíduos sobre o solo, formando pilhas que ocupam áreas consideráveis nas mineradoras. Outro impacto que será mitigado é a devastação ambiental ocasionada com a extração da areia oriunda dos rios utilizada na confecção das argamassas. Colaborando com o melhoramento do ciclo de vida das indústrias de mineração da scheelita e da construção civil na região das minas.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7211**: Agregados para concreto – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2022a.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13278**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro: ABNT, 2005a.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13280**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro: ABNT, 2005c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13281-1**: Argamassas inorgânicas – Requisitos e métodos de ensaios. Parte 1: Argamassas para revestimento de paredes e tetos. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13529**: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14081-2**: Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas. Parte 2: Execução do substrato-padrão e aplicação da argamassa para ensaios. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15220-1**: Desempenho térmico de edificações. Parte 1: Definições, símbolos e unidades. Rio de Janeiro: ABNT, 2005d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15220-2**: Desempenho térmico de edificações. Parte 2 – Componentes e elementos construtivos das edificações – Resistência e transmitância térmica – Métodos de cálculo (ISO 6946:2017 MOD). Rio de Janeiro: ABNT, 2022b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15220-3**: Desempenho térmico de edificações. Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro: ABNT, 2005e.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15258**: Argamassa para revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência potencial de aderência à tração. Rio de Janeiro: ABNT, 2021a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15259**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. Rio de Janeiro: ABNT, 2005f.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15575-1**: Edificações habitacionais – Desempenho. Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15575-4**: Edificações habitacionais – Desempenho. Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas – SVVIE. Rio de Janeiro: ABNT, 2021b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15630**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16916**: Agregado miúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2021c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16972**: Agregados – Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2021d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16973**: Agregados – Determinação do material fino que passa pela peneira de 75 µm por lavagem. Rio de Janeiro: ABNT, 2021e.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 17054**: Agregados – Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2022c.

AZEVEDO, I. N. **Avaliação de desempenho de argamassas de ligantes aéreos ou hidráulicos**. 2015. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2015.

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

CALLISTER JÚNIOR, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2024.

CARASEK, H. Argamassas. In: ISAIA, G. C. (ed.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2017. p. 922-969.

COUTO, A. F. do *et al.* Avaliação preliminar dos efeitos da substituição parcial do agregado miúdo por Cinza de Madeira de Eucalipto (CME) nas propriedades das argamassas. **Revista de Engenharia Civil IMED**, Passo Fundo, v. 5, n. 2, p. 84-98, dez. 2018.

FARIAS FILHO, J. *et al.* Estudo da durabilidade de argamassas alternativas contendo resíduos. **Cerâmica**, [s. l.], v. 57, p. 395-403, 2011. Disponível em: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2s2.084856389639&partnerID=MN8TOARS>. Acesso em: 13 abr. 2022.

FEIJÓ, T. T. **Análise do desempenho térmico de painéis de vedação produzidos com fibrocimento aplicáveis à habitação de interesse social em Maceió-AL**. 2013. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo: Dinâmicas do Espaço Habitado) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2013.

FÉLIX, J. F. L. **Caracterização do processo de produção da scheelita no município de Currais Novos/RN**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciência e Tecnologia) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Angicos, 2020.

FREITAS, C. de. **Argamassas de revestimento com agregados miúdos de britagem da região metropolitana de Curitiba**: propriedades no estado fresco e endurecido. 2010. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

GOTO, H.; RIBEIRO, J. P. C.; CENTOFANTE, R. **Materiais da construção**. Porto Alegre: SAGAH, 2018.

HADDAD, L. D. de O. *et al.* Influence of particle shape and size distribution on coating mortar properties. **Journal of Materials Research and Technology**, [s. l.], v. 9, n. 4, p. 9299-9314, july/aug. 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.06.068>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785420314691?via%3Dihub>. Acesso em: 20 abr. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Mineração no Brasil**. Disponível em: <https://portaldamineracao.com.br/sobre-a-mineracao/>. Acesso em: 18 maio 2022.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3. ed. Rio de Janeiro: ELETROBRAS/PROCEL, 2014.

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

MACEDO, J. W. N. de. **Argamassa de revestimento produzida a partir da substituição do agregado natural por resíduo de scheelita e pó de pedra**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2021.

MACEDO, J. W. N. de *et al.* Argamassas produzidas com resíduos de scheelita e pó de pedra: uma revisão sistemática da literatura. **Revista Principia**, João Pessoa, n. 1, p. 166-188, 2021.

MATTANA, A. J. *et al.* Análise hierárquica para escolha entre agregado natural e areia de britagem de rocha para confecção de argamassas de revestimento. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 12, n. 4, p. 63-79, out./dez. 2012.

MEDEIROS, A. G. de. **Propriedades de concreto sustentável produzido com pó do polimento do porcelanato e resíduo da scheelita**. 2019. Tese (Doutorado em Manejo de Solo e Água) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2019.

MEDEIROS, B. A. *et al.* Mechanical properties of mortar produced with the replacement of natural sand by scheelite residue. **Cerâmica**, [s. l.], v. 65, n. 375, p. 443-451, july/sept. 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132019653752571>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ce/a/jpZQxgxPFq4g3wXhv6YdC6Q/?lang=en>. Acesso em: 12 abr. 2022.

MEDEIROS, B. L. de A. V. *et al.* Resistance to the alkali-aggregate reaction of sustainable mortars produced with scheelite tailings in replacing natural sand aggregates. **Research, Society and Development**, [s. l.], v. 10, n. 14, p. 1-10, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i14.22209>. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/22209>. Acesso em: 14 abr. 2022.

MEDEIROS, M. **Estudo de argamassas de revestimento com resíduo de scheelita**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

MENDES, J. C. *et al.* On the relationship between morphology and thermal conductivity of cement-based composites. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 104, p. 1-12, nov. 2019.

MENEZES, F. Y. M. *et al.* Adição de EVA e vermiculita em argamassas de revestimento: análise do desempenho térmico. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 17., 2018, Foz do Iguaçu. **Anais [...]**. Porto Alegre: ANTAC, 2018. p. 203-213.

MINERAÇÃO TOMAZ SALUSTINO S/A. **Mina Brejuí**. Disponível em: <http://minabreju.com.br/>. Acesso em: 31 mar. 2023.

MORAIS, C. F. *et al.* Análise de condutividade térmica de argamassas de revestimento com rejeito de minério de ferro. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 18., 2020, Porto Alegre. **Anais [...]**. Porto Alegre: ANTAC, 2020. p. 1-8.

MUKHOPADHYAYA, P. *et al.* Correlation Between Water Vapour and Air Permeability of Building Materials: Experimental Observations. **Journal of ASTM International**, [s. l.], v. 8, n. 3, p. 1-14, 2011.

NAÇÕES UNIDAS. **Uso de areia deve ser estratégico para evitar impactos ambientais, alerta Pnuma**. 2022. Disponível em: <https://news.un.org/pt/story/2022/04/1787322#:~:text=A%20extra%C3%A7%C3%A3o%20de%20areia%20em,de%20gerar%20impactos%20na%20biodiversidade>. Acesso em: 30 mar. 2023.

NASCIMENTO, R. F. *et al.* Viabilidade de incorporação de resíduo de scheelita em argamassa. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, [s. l.], v. 12, n. 3, p. 431-439, 2021. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.003.0035>. Disponível em: <http://www.sustenere.co/index.php/rica/article/view/CBPC2179-6858.2021.003.0035>. Acesso em: 31 mar. 2023.

PAIVA, E. H. G. **Avaliação do concreto de cimento Portland com resíduo da produção de scheelita em substituição ao agregado miúdo**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

PAIXÃO, C. A. *et al.* Estudo da Viabilidade de Utilização de Resíduos Cerâmicos para Confecção de Argamassas. **Cerâmica Industrial**, [s. l.], v. 16, n. 4, p. 33-38, jul. 2011.

PASTORE, M. **Demanda global de areia pode aumentar em 45% e levar à escassez do material**. 2022. Disponível em: <https://www.cimentoitambe.com.br/massacinzena/demanda-global-de-areia-pode-aumentar-em-45-e-levar-a-escassez-domaterial/>. Acesso em: 18 maio 2022.

QUEIROZ NETO, M. L. *et al.* Uso de resíduos da mineração de scheelita em argamassas de assentamento e revestimento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, 7., 2016, Campina Grande. **Anais [...]**. Campina Grande: IBEAS, 2016. p. 1-7.

RAMOS FILHO, R. E. B. **Estudo da combinação de resíduo de scheelita, pó de pedra e manipueira com aglomerantes para produção de tijolos ecológicos**. 2021. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2021.

REVISTA AREIA E BRITA. São Paulo: ANEPAC, jan. 2024. ISSN 1518-4641 versão *online*. Disponível em: <https://anepac.org.br/revistas/edicao-80-2024-janeiro/>. Acesso em: 20 fev. 2024.

RIO GRANDE DO NORTE. Secretaria do Desenvolvimento Econômico, da Ciência, da Tecnologia e da Inovação. **Mineração**. Rio Grande do Norte: SEDEC, 2021. Disponível em: <http://www.sedec.rn.gov.br/Conteudo.asp?TRAN=ITEM&TARG=15440&ACT=&PAGE=0&PARM=&LBL=Minera%E7%E3o>. Acesso em: 06 abr. 2023.

SALGADO, J. C. P. **Técnicas e práticas construtivas para edificação**. 4. ed. São Paulo: Érica, 2018.

SANTOS, W. J. dos *et al.* Proposta de método de dosagem para argamassas de revestimento com areia artificial de britagem. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 18, n. 1, p. 225-243, jan./mar. 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212018000100218>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ac/a/TCrHHySXgP7Dcncb5wNmD3b/?lang=pt#>. Acesso em: 28 abr. 2023.

SILVA, L. de M. *et al.* Caracterização de resíduos minerais visando aplicação como agregado para materiais de matriz cimentícia. **Revista Construindo**, Belo Horizonte, v. 11, n. 1, p. 21-30, jan./jul. 2019.

SILVA, L. R. da. **Tungstênio**. Rio Grande do Norte: Agência Nacional de Mineração, 2018. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/sumario-mineral/sumario-mineral-brasileiro-2018>. Acesso em: 6 abr. 2023.

SOUZA, M. H. O. *et al.* Influência do tipo de cura no comportamento mecânico de argamassas confeccionadas com areia de scheelita. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, [s. l.], v. 14, n. 2, p. 91-94, 2019. Disponível em: [www.ufcg.edu.br](http://www.ufcg.edu.br). Acesso em: 14 abr. 2022.

SOUZA, R. S. de. **Argamassas produzidas a partir da substituição do agregado miúdo pelo resíduo do beneficiamento da scheelita e da água de hidratação por manipueira**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

SOUZA, R. S. *et al.* Estudo das propriedades de argamassas produzidas com resíduos do beneficiamento da scheelita. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 14., 2023, João Pessoa. **Anais [...]**. [S. l.]: ANTAC, 2023. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/sbta/article/view/4790>. Acesso em: 10 jan. 2024.

TAKAOKA, M. V. **Diretrizes de Ação**. Brasil: Conselho Brasileiro de Construção Sustentável, 2013. Disponível em: <http://www.cbcs.org.br/website/institucional/show.asp?ppgCode=CA4D48EC-82E0-4FED-BAF7-11E3DACBE63B>. Acesso em: 05 dez. 2023.

TOKARSKI, R. B. **Comportamento da areia de britagem de rocha calcária na argamassa de revestimento**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2017.