

**DESENVOLVIMENTO DE ARGAMASSAS COLANTES COM
INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DO BENEFICIAMENTO DE
ROCHAS ORNAMENTAIS**

MARILUCIA DOS SANTOS SILVA

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE – UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

SETEMBRO – 2023

**DESENVOLVIMENTO DE ARGAMASSAS COLANTES COM
INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DO BENEFICIAMENTO DE
ROCHAS ORNAMENTAIS**

MARILUCIA DOS SANTOS SILVA

Dissertação de mestrado apresentada ao Centro de
Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do
Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das
exigências para obtenção do título de Mestre em
Engenharia Civil.

Orientador: D.Sc. Jonas Alexandre

Coorientador: D.Sc. Niander Aguiar Cerqueira

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE – UENF
CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
SETEMBRO - 2023**

FICHA CATALOGRÁFICA

UENF - Bibliotecas

Elaborada com os dados fornecidos pela autora.

S586 Silva, Marilucia dos Santos.

DESENVOLVIMENTO DE ARGAMASSAS COLANTES COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DO BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS / Marilucia dos Santos Silva. - Campos dos Goytacazes, RJ, 2023.

96 f. : il.
Inclui bibliografia.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciência e Tecnologia, 2023.

Orientador: Jonas Alexandre.
Coorientador: Niander Aguiar Cerqueira.

1. argamassa colante. 2. agregado miúdo. 3. resíduo de rocha ornamental. I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. II. Título.

CDD - 624

**DESENVOLVIMENTO DE ARGAMASSAS COLANTES COM
INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DO BENEFICIAMENTO DE
ROCHAS ORNAMENTAIS**

MARILUCIA DOS SANTOS SILVA

Dissertação mestrado apresentada ao Centro de
Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do
Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das
exigências para obtenção do título de Mestre em
Engenharia Civil.

Aprovada em 01 de setembro de 2023

Comissão Examinadora:

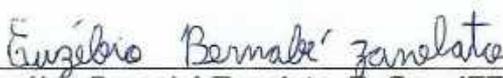


Juliana Fadini Natalli, D. Sc.- LAMAV/UENF

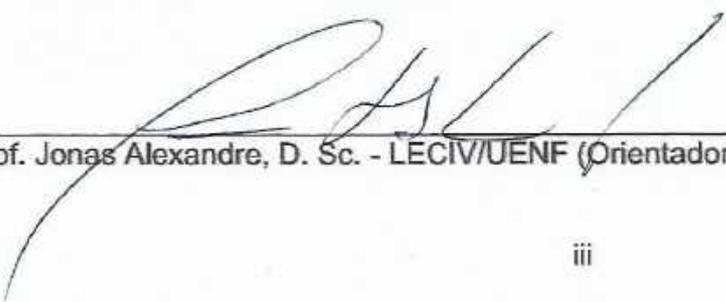
Prof. Markssuel Teixeira Marvila, D. Sc. - UFV



Prof. Niander Aguiar Cerqueira, D. Sc. - LECIV/UENF



Prof. Euzébio Bernabé Zanelato, D. Sc. - IFF



Prof. Jonas Alexandre, D. Sc. - LECIV/UENF (Orientador)



Governo do Estado do Rio de Janeiro
Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro
Centro de Ciência e Tecnologia

DECLARAÇÃO

Declaro para os fins devidos que a versão final da dissertação de Mestrado da aluna Marilucia dos Santos Silva, cujo título é "Desenvolvimento de Argamassas Colantes com Incorporação de Resíduos de Beneficiamento de Rochas Ornamentais", foi aprovada pelo Prof. DSc. Markssuel Teixeira Marvila, membro da banca, impossibilitado de assinar presencialmente o documento.

Jonas Alexandre

Professor Associado - LECIV / UENF



Av. Alberto Lamego, 2000 - Parque Califórnia - Campos dos Goytacazes, RJ - 28.013-602
Tel.: (22) 2739-7047- Fax: (22) 2739-7381 - correio eletrônico: leciv@uenf.br



Documento assinado eletronicamente por **Jonas Alexandre, Professor**, em 23/11/2023, às 16:10, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento nos art. 28º e 29º do [Decreto nº 48.209, de 19 de setembro de 2022](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.rj.gov.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=6, informando o código verificador **63872838** e o código CRC **F8EC3733**.

Referência: Processo nº SEI-260009/005942/2023

SEI nº 63872838

Avenida Alberto Lamego, 2000, - Bairro Pq. Califórnia, Campos dos Goytacazes/RJ, CEP 28013-602
Telefone: - www.uenf.br

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, por ter me guiado durante toda a minha trajetória, e por me ajudar a superar todos os momentos de dificuldade.

Aos meus pais José Augusto e Gilda que sempre estiveram ao meu lado, me dando força para alcançar todos os meus objetivos e sonhos. Em especial a minha mãe que esteve sempre ao meu lado me ajudando na execução de todos os ensaios no laboratório, a qual sou imensamente grata.

Ao meu avó Abelardo, que infelizmente não está entre nós, e que ficara imensamente feliz com a minha conquista.

Aos meus amigos internos e externos da UENF que sempre me apoiaram nos momentos mais difíceis, e me ajudaram a superar minhas limitações.

Aos meus gestores da Porto Açu, por sempre me apoiarem durante todo o desenvolvimento do meu mestrado.

Ao professor Jonas Alexandre, ao professor Euzébio, ao professor Afonso e ao professor Niander pelo apoio.

A todos que direta ou indiretamente, estiveram comigo durante essa trajetória.

SUMÁRIO

| | |
|--|------|
| LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS..... | viii |
| LISTA DE FIGURAS | x |
| LISTA DE TABELAS | xii |
| RESUMO..... | xiii |
| ABSTRACT | xiv |
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1. OBJETIVOS | 3 |
| 1.1.1. Objetivo geral | 3 |
| 1.1.2. Objetivos específicos..... | 3 |
| 1.2. JUSTIFICATIVA | 3 |
| 2.1. PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS..... | 5 |
| 2.1.1. Trabalhabilidade | 5 |
| 2.1.2. Aderência | 6 |
| 2.1.3. Capacidade de absorver deformações..... | 7 |
| 2.2. ARGAMASSAS COLANTES | 8 |
| 2.3. ADITIVOS QUÍMICOS PARA PRODUÇÃO DE ARGAMASSAS COLANTES ... | 12 |
| 2.4. PRODUÇÃO DE ROCHAS ORNAMENTAIS NO BRASIL | 13 |
| 2.4.1. Extração | 18 |
| 2.4.2. Beneficiamento..... | 20 |
| 2.5. PRODUÇÃO DE RESÍDUOS DO BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS | 21 |
| 2.6. INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE ROCHAS ORNAMENTAIS EM MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO..... | 23 |
| 3. METODOLOGIA..... | 29 |
| 3.1 MATERIAIS UTILIZADOS | 29 |
| 3.1.1. Cimento Portland CP V – ARI | 29 |
| 3.1.2. Aditivos Químicos..... | 29 |
| 3.1.3. Agregado miúdo | 29 |
| 3.1.4. Água | 30 |
| 3.1.5. Resíduo de rocha ornamental | 30 |

| | |
|--|----|
| 3.1.6. Confeção de Substrato Padrão | 30 |
| 3.2. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS | 32 |
| 3.2.1. Granulometria..... | 32 |
| 3.2.2. Composição dos elementos | 33 |
| 3.2.3. Dosagem | 33 |
| 3.3. ENSAIOS NO ESTADO FRESCO | 34 |
| 3.3.1. Retenção de água | 34 |
| 3.3.2. Densidade de massa e teor de ar incorporado..... | 36 |
| 3.3.3. Deslizamento..... | 38 |
| 3.4. ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO | 39 |
| 3.4.1. Determinação do tempo em aberto | 39 |
| 3.4.2. Determinação de resistência à aderência à tração | 40 |
| 3.5. ANÁLISE ESTATÍSTICA | 43 |
| 4. ANÁLISE DOS RESULTADOS | 45 |
| 4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS | 45 |
| 4.1.1. Caracterização da areia | 45 |
| 4.1.2. Caracterização do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais | 46 |
| 4.2. ENSAIOS REALIZADOS NO ESTADO FRESCO | 47 |
| 4.2.1. Densidade de massa e teor de ar incorporado..... | 47 |
| 4.2.2. Retenção de água | 52 |
| 4.2.3. Deslizamento..... | 54 |
| 4.3. ENSAIOS REALIZADOS NO ESTADO ENDURECIDO..... | 57 |
| 4.3.1. Tempo em aberto | 57 |
| 4.3.2. Aderência à tração | 60 |
| 5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS | 67 |
| 5.1. CONCLUSÃO GERAL | 67 |
| 5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 68 |
| 6. REFERÊNCIAS | 69 |
| Apêndice I - Planilha de ensaio de resistência de aderência à tração (MPa) – Cura Normal..... | 76 |
| Apêndice II - Planilha de ensaio de resistência de aderência à tração (MPa) – Cura por Imersão | 78 |

| | |
|--|----|
| Apêndice III – Planilha de ensaio de resistência de aderência à tração (MPa) – Cura em Estufa | 79 |
| Anexo I – Planilha resumo dos dados utilizados na análise estatística (ANOVA) – Ensaio de tempo em aberto (MPa)..... | 80 |
| Anexo II – Planilha resumo dos dados utilizados na análise estatística (ANOVA) – Ensaio de resistência a aderência tração – Cura Normal (MPa)..... | 81 |
| Anexo III – Planilha resumo dos dados utilizados na análise estatística (ANOVA) – Ensaio de resistência a aderência tração – Cura em Estufa (MPa) | 82 |
| Anexo IV – Planilha resumo dos dados utilizados na análise estatística (ANOVA) – Ensaio de resistência a aderência tração – Cura por Imersão (MPa) | 83 |

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

τ – Tensão de cisalhamento (Pa)

τ_0 – Tensão de escoamento (Pa)

η_p – Viscosidade plástica do sistema (Pa.s)

γ – Taxa de cisalhamento (s^{-1})

d - densidade de massa no estado fresco (kg/m^3)

mc - massa do recipiente cilíndrico contendo argamassa (g)

mv - massa do recipiente cilíndrico vazio (g)

vr volume do recipiente cilíndrico (cm^3)

dt - densidade de massa teórico (g/cm^3), obtido através de

mi - massa seca de cada componente da argamassa, mais água (g)

γ_i - massa específica de cada componente da argamassa (g/cm^3)

A - teor de ar incorporado (%)

d - é o valor da densidade de massa da argamassa, em g/cm^3

dt - é o valor da densidade de massa teórica da argamassa, em g/cm^3 , sem vazios

Lf - leitura da posição final, expressa em milímetros (mm)

Li - leitura da posição inicial, expressa em milímetros (mm)

ot - tensão de ruptura (MPa)

T - carga de ruptura (N)

A - área da placa cerâmica (mm^2)

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|------|
| Figura 1: Sistema de revestimento típico (INCEOGLU et al., 2021)..... | 10 |
| Figura 2: Perfil da produção brasileira por tipo de rocha em 2022 (Adaptada de Abirochas, 2023)..... | 15 |
| Figura 3: Processo de fabricação de rochas ornamentais (Adaptado de Faria et al., 2017) | 18 |
| Figura 4: Produção de lavra (Abirochas, 2019)..... | 199 |
| Figura 5: a) Teares multilâminas de aço. b) Teares multifios diamantados | 211 |
| Figura 6: Comparação da amostra com valor de referência de 32,5 N (Sánchez et al., 2019) | 244 |
| Figura 7: Comparação da amostra com limite de referência de 42,5 N (Sánchez et al., 2019) | 255 |
| Figura 8: a) Resistencia a tração MPa e b) Resistência a compressão MPa (Buyuksagis et al., 2017)..... | 26 |
| Figura 9: Resistência à compressão e flexão das formulações de argamassa modificada com polímero (Gado, 2022) | 277 |
| Figura 10: Resistencia a tração em MPa e b) Resistência a compressão em MPa (Oggu et al., 2022) | 277 |
| Figura 11: a) e b) Poço de decantação onde o resíduo foi retirado (Próprio autor)... | 30 |
| Figura 12: Forma metálica utilizada para confecção dos substratos..... | 311 |
| Figura 13: a) Armaduras confeccionadas; b) Conjunto armadura e forma | 322 |
| Figura 14: Aparelho para análise química EDX-7000 Shimadzu..... | 333 |
| Figura 15: - Aparelho para retenção de água em argamassas da marca Solotest.. | 355 |
| Figura 16: a) Recipiente para densidade de massa b) Conjunto balança de precisão e recipiente da marca Solotest..... | 377 |
| Figura 17: Aparelho para análise de teor de ar incorporado da marca Solotest.... | 3388 |
| Figura 18: Ensaio de deslizamento | 399 |

| | |
|---|-----|
| Figura 19: (a) Argamassa estendida sobre o substrato padrão; b) Placas cerâmicas posicionadas sobre o substrato após 15 minutos e c) Execução do ensaio de resistência à tração | 40 |
| Figura 20: Conjunto submetido a cura normal em ambiente de laboratório | 41 |
| Figura 21: Conjunto submetido a cura por imersão..... | 422 |
| Figura 22: Conjunto submetido a cura em estufa a temperatura de 70° | 422 |
| Figura 23: Detalhamento típico de Ruptura. Fonte: NBR 14081 (2012)..... | 433 |
| Figura 24: Curva granulométrica da areia | 455 |
| Figura 25: Curva granulométrica do resíduo proveniente do beneficiamento de rochas ornamentais..... | 466 |
| Figura 26: Resultados do ensaio de teor de ar incorporado..... | 488 |
| Figura 27: Resultados do ensaio de densidade de massa | 49 |
| Figura 28: Resultado do ensaio de retenção de água..... | 533 |
| Figura 29: Resultados do ensaio de deslizamento..... | 555 |
| Figura 30: Resultados do ensaio de tempo em aberto | 57 |
| Figura 31: Resultado do ensaio de resistência a aderência à tração - Cura normal . | 61 |
| Figura 32: Resultados do ensaio de resistência a aderência à tração - Cura em estufa..... | 61 |
| Figura 33: Resultados do ensaio de resistência a aderência à tração - Cura por imersão | 622 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1: Propriedades correlacionadas a trabalhabilidade das argamassas colantes (Adaptada de CARASEK, 2010)..... | 6 |
| Tabela 2: Propriedades fundamentais das argamassas colantes (ABNT 2012) | 11 |
| Tabela 3: Propriedades opcionais das argamassas colantes (ABNT, 2012)..... | 12 |
| Tabela 4: Perfil da produção brasileira por região (ABIROCHAS, 2023) | 16 |
| Tabela 5: Referência de traços utilizados | 34 |
| Tabela 6: Elementos na forma de óxidos presentes no resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais..... | 47 |
| Tabela 7: ANOVA do efeito do percentual de resíduo sobre a densidade de massa | 50 |
| Tabela 8: Teste de Turkey do efeito do percentual de resíduo sobre a densidade de massa..... | 51 |
| Tabela 9: ANOVA do efeito do percentual de resíduo no teor de ar incorporado..... | 51 |
| Tabela 10: Teste de Turkey do efeito do percentual de resíduo sobre o teor de ar incorporado | 52 |
| Tabela 11: ANOVA efeito do percentual de resíduo na retenção de água | 54 |
| Tabela 12: ANOVA efeito do percentual de resíduo no deslizamento..... | 56 |
| Tabela 13: ANOVA do efeito do percentual de resíduo tempo em aberto..... | 59 |
| Tabela 14: Teste de Turkey do efeito do percentual de resíduo sobre tempo em aberto | 59 |
| Tabela 15: ANOVA do efeito do percentual de resíduo na resistência à aderência – Cura normal..... | 64 |
| Tabela 16: Teste de Turkey do efeito do percentual de resíduo na resistência à aderência – Cura normal..... | 64 |
| Tabela 17: ANOVA do efeito do percentual de resíduo na resistência a aderência - Cura em estufa..... | 65 |
| Tabela 18: Teste de Turkey do efeito do percentual de resíduo na resistência à aderência - Cura em estufa | 65 |
| Tabela 19: ANOVA do efeito do percentual de resíduo na resistência à aderência – Cura por imersão..... | 66 |
| Tabela 20: Teste de Turkey do efeito do percentual de resíduo na resistência à aderência – Cura por imersão | 66 |

RESUMO

As argamassas colantes são materiais de construção constituídos a partir da mistura de cimento Portland, agregado miúdo e aditivos químicos, que misturados com água, formam uma massa viscosa, plástica e aderente, empregada no assentamento de placas cerâmicas ou pedras de revestimento. São classificados ainda por sua aplicabilidade em argamassas do tipo ACI, ACII ou ACIII. Com o objetivo de avaliar a viabilidade técnica da produção de argamassas colantes com resíduos provenientes da indústria de rochas ornamentais, este trabalho foi desenvolvido considerando a substituição parcial do agregado miúdo por resíduos do beneficiamento das rochas ornamentais produzidas pela empresa Santa Alice Granitos, localizada no estado do Espírito Santo. O traço utilizado para confecção das argamassas colantes foi 1:2 e as proporções de substituição em massa do agregado miúdo pelo resíduo, foram realizadas nas porções de 0%, 10%, 20% e 30%. As principais propriedades que foram analisadas no estado fresco foram a densidade de massa, o teor de ar incorporado, a retenção de água e o deslizamento. No estado endurecido, foram analisadas as propriedades de tempo em aberto e a resistência de aderência à tração sobre três diferentes tipos de cura, sendo cura normal, por imersão e em estufa. Os resultados obtidos com o programa experimental, indicaram que a incorporação de resíduos de rochas ornamentais às argamassas colantes, representou significativas mudanças em suas propriedades tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. No estado fresco, foi observado uma redução gradual no percentual de ar incorporado e um aumento na densidade de massa das argamassas com o incremento de finos as misturas. No estado endurecido, ocorreu um ganho de resistência a aderência à tração nas argamassas com maiores teores de substituição. Os resultados indicaram que a porção de substituição de 30% apresentou os melhores resultados entre as propriedades analisadas. O incremento de 30% de substituição foi o que apresentou a maior resistência de aderência com 0,97 MPa quando submetida a cura normal, sendo superior ao exigido pela norma de 0,5 MPa podendo ser classificada como argamassa do tipo ACI ou ACII. Os resultados indicaram o potencial da utilização do resíduo proveniente do beneficiamento de rochas ornamentais para produção de argamassas colantes.

Palavras-chave: argamassa colante, agregado miúdo, resíduo de rocha ornamental.

ABSTRACT

Adhesive mortars are construction materials made from a mixture of Portland cement, fine aggregate and chemical additives, which, mixed with water, form a viscous, plastic and adherent mass, used for laying ceramic tiles or covering stones. They are also classified by their applicability in mortars of the ACI, ACII or ACIII type. With the objective of evaluating the technical feasibility of producing adhesive mortars with residues from the ornamental stone industry, this work was developed considering the partial replacement of fine aggregate with residues from the processing of ornamental rocks produced by the company Santa Alice Granitos, located in the state of the Holy Spirit. The mix used to make the adhesive mortars was 1:2 and the proportions of mass replacement of the fine aggregate with the residue were carried out in portions of 0%, 10%, 20% and 30%. The main properties that were analyzed in the fresh state were mass density, incorporated air content, water retention and sliding. In the hardened state, the open time properties and tensile adhesion strength were analyzed under three different types of curing, including normal curing, immersion curing and oven curing. The results obtained with the experimental program indicated that the incorporation of ornamental rock residues into adhesive mortars represented significant changes in their properties in both the fresh and hardened states. In the fresh state, a gradual reduction in the percentage of incorporated air and an increase in the mass density of the mortars was observed with the increase in fines in the mixtures. In the hardened state, there was a gain in tensile adhesion strength in mortars with higher replacement levels. The results indicated that the 30% replacement portion presented the best results among the properties analyzed. The 30% replacement increment was the one that presented the highest adhesion resistance with 0.97 MPa when subjected to normal curing, being higher than that required by the standard of 0.5 MPa and can be classified as ACI or ACII type mortar. The results indicated the potential for using residue from the processing of ornamental rocks to produce adhesive mortars.

Keywords: adhesive mortar, fine aggregate, ornamental rock residue.

1. INTRODUÇÃO

As argamassas possuem diversas aplicabilidades no setor de construção civil, podendo ser confeccionadas no local de aplicação ou adquiridas pré-doseadas. É fundamental a escolha da argamassa mais adequada para cada situação específica, devido à necessidade de compatibilização com outros elementos construtivos (Travincas *et al.*, 2023).

As argamassas são materiais amplamente utilizados nas obras de alvenaria e possuem diferentes finalidades durante o desenvolvimento da obra. São materiais aproveitados nas etapas de aplicação de revestimentos, como reboco de paredes e tetos, contrapiso para nivelamento do piso, assentamento e rejuntamento de placas cerâmicas ou pedras de revestimentos.

As argamassas utilizadas para assentamento de placas cerâmicas ou pedras de revestimento, são denominadas argamassas colantes, materiais de construção constituídos a partir da mistura de aglomerantes hidráulicos, agregados minerais e aditivos que possibilitam quando preparada em obra com adição exclusiva de água, a formação de uma massa viscosa, plástica e aderente. Para sua aplicação é necessário a utilização de desempenadeiras denteadas, e sua aplicação ocorre em uma camada relativamente fina quando comparada as argamassas convencionais (Fiorito, 2010., Modler *et al.*, 2021., ABNT NBR 14081, 2012).

As argamassas colantes são normalizadas pela NBR 14081-1 (ABNT, 2012) e classificadas por sua aplicabilidade na construção civil em argamassas do tipo AC I, AC II e AC III. Tendo como características principais das argamassas colantes o tempo em aberto, resistência à aderência e deslizamento.

Segundo Inceoglu *et al.*, (2021) nem sempre o aglomerante utilizado para produção de argamassas por si só atende às necessidades construtivas, sendo necessário adições à argamassa para dotá-las de certas propriedades.

Os aditivos utilizados para produção de argamassas colantes são polímeros, macromoléculas resultantes da união de muitas unidades de moléculas menores (monômeros) que quando utilizado em argamassas colantes contribuem nas propriedades como, tempo em aberto e retenção de água. A incorporação de aditivos nas argamassas e concretos contribui para o ganho de resistência mecânica e durabilidade, como também, para a redução na frequência de manutenções e reparos

quando comparada às construções feitas com argamassa e concretos convencionais (Nicolini *et al.*, 2022).

As argamassas colantes ocupam um papel importante no setor da construção civil, sendo verificado o aumento da demanda por esse tipo de material ao longo dos anos. Esse fato pode ser explicado pelo processo de verticalização dos grandes centros urbanos brasileiros.

Esse processo de verticalização acelerado demanda do setor da construção civil novas metodologias que sejam capazes reduzir prazos de execução, custo de implantação, sem perder a qualidade do ativo construído. Diante desse cenário, a utilização de revestimentos cerâmicos nas fachadas das edificações se tornou uma alternativa viável tecnicamente e economicamente o que ocasionou um aumento na demanda de argamassas colantes para suprir as necessidades do mercado em pleno desenvolvimento. Vale ressaltar que os revestimentos cerâmicos ou pedras de revestimento são utilizados tanto pelo efeito estético quanto pela durabilidade e resistência.

No entanto, é fundamental buscar novas tecnologias e metodologias construtivas que sejam capazes de proporcionar um maior ganho de resistência, uma vez que, as fachadas das edificações sofrem diversas solicitações físicas e mecânicas causadas pelas variações de temperatura durante o dia, decorrentes da insolação, do vento e das chuvas (Ribeiro *et al.*, 2023).

Em decorrência das solicitações físicas, mecânicas, metodologia de aplicação e especificidade do material ligante, diversas patologias podem surgir nas fachadas das edificações ocasionando problemas estéticos e de segurança em virtude do desprendimento de placas cerâmicas.

Com isso, a explorar novas tecnologias para serem empregadas no setor de construção civil, visando melhorar as propriedades do material utilizado, proporcionando maior durabilidade e contribuindo para desenvolvimento sustentável se fazem necessário. Uma vez que, esse mesmo ramo da indústria é responsável pela geração de grandes quantidades de resíduos sólidos que não possuem uma atividade prática definida, como por exemplo os resíduos provenientes do beneficiamento de rochas ornamentais e que apresentam características físicas e químicas propícias a ser empregado na produção de argamassas e concretos.

Considerando o exposto, este trabalho teve como principal motivação o desenvolvimento de argamassas colantes, com substituição em massa do agregado

miúdo por resíduos do beneficiamento de rochas ornamentais, com o intuito de avaliar o desempenho das argamassas com diferentes teores de substituição e verificar a viabilidade quanto à incorporação do resíduo para a produção de argamassas colantes.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar a viabilidade da utilização de resíduos oriundos do beneficiamento de rochas ornamentais na produção de argamassas colantes.

1.1.2. Objetivos específicos

Como objetivos específicos deste trabalho podem ser citados:

- Analisar os parâmetros no estado fresco (retenção de água, teor de ar incorporado, densidade de massa e deslizamento) de uma argamassa de referência e de argamassas contendo substituição parcial do agregado miúdo pelo resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais;
- Analisar os parâmetros no estado endurecido (resistência de aderência à tração e tempo em aberto) de uma argamassa de referência e de argamassas contendo substituição do agregado miúdo pelo resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais.
- Identificar a classe da argamassa colante produzida nessa pesquisa (ACI, ACII e ACIII) com base no teste de aderência.

1.2. JUSTIFICATIVA

O Brasil é um dos maiores produtores de rochas ornamentais do mundo. No ano de 2022, as exportações de rochas ornamentais somaram mais de US\$ 1.284,9 milhões e 2,1 milhões de toneladas (ABIROCHAS, 2023).

Em decorrência da extração e do beneficiamento das rochas ornamentais para comercialização, esse setor da indústria é responsável pela geração de grandes quantidades de resíduos sólidos que atualmente não possuem uma aplicabilidade prática definida, e muitas vezes estão dispostos nos aterros das fábricas, criando problemas ambientais e de armazenamento.

A utilização do resíduo de rocha ornamental em substituição a utilização parcial da areia para produção de argamassas colantes, visa contribuir com a redução das atividades extrativistas da areia nos rios, uma vez que, essa atividade causa danos consideráveis ao meio ambiente, como a incidência de processos erosivos, assoreamento de rios, danos à fauna e flora terrestres, depreciação da qualidade da água e dos lençóis freáticos, entre outros (Gado, 2022).

Neste contexto, o presente trabalho se justifica pela contribuição tecnologia com o viés científico, econômico e ambiental. Uma vez que, propõe a utilização de um subproduto da indústria de valor econômico reduzido ser empregado na construção civil para produção de argamassas colantes.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS

As argamassas são materiais de construção formados a partir da mistura de aglomerantes, agregado miúdo e água, podendo conter ainda aditivos ou adições químicas e minerais (ABNT NBR 13281, 2005).

As argamassas possuem diferentes funções na construção civil, podendo ser utilizada para o assentamento de alvenaria, revestimento interno ou externo, regularização de pisos, assentamento de revestimentos de cerâmicos e pedras de revestimentos. Suas utilizações distintas justificam a análise de algumas propriedades que caracterizam cada uma das argamassas.

As principais propriedades das argamassas de assentamento são trabalhabilidade, aderência, resistência mecânica e capacidade de absorver deformações. Para a argamassa de revestimento, além das propriedades citadas acima são necessárias à verificação da retração e a permeabilidade à água. Entretanto, para as argamassas colantes as principais propriedades são trabalhabilidade, aderência ao substrato e a capacidade de absorver deformações (Carasek, 2010).

2.1.1. Trabalhabilidade

A trabalhabilidade é considerada uma das principais propriedades das argamassas no estado fresco, uma vez que, determina a facilidade com que a argamassa pode ser misturada, transportada, aplicada sob o substrato, consolidada e acabada em uma condição homogênea (Carasek, 2010). Ainda segundo a autora, a trabalhabilidade das argamassas colantes está correlacionada a outras propriedades como retenção de água, tempo em aberto, deslizamento e adesão inicial. Essas propriedades correlacionadas estão definidas conforme Tabela 1.

Tabela 1: Propriedades correlacionadas a trabalhabilidade das argamassas colantes (Adaptada de CARASEK, 2010).

| Propriedade | Definição |
|--------------------|---|
| Retenção de água | Propriedade associada a capacidade da argamassa no estado fresco manter sua trabalhabilidade, quando sujeita a solicitações que provocam a perda de água. |
| Tempo em aberto | Período em que a argamassa é aplicada sob o substrato e o tempo em que ela perde a capacidade de proporcionar a aderência. |
| Deslizamento | Propriedade que determina o deslocamento da peça cerâmica após a sua aplicação sob o substrato. |
| Adesão inicial | Capacidade de união inicial da argamassa no estado fresco a uma base. |

Segundo Alonso *et al.*, (2017) a trabalhabilidade das argamassas pode ser definida como a habilidade que as argamassas possuem de fluir ou espalhar-se por toda a área da face do componente de alvenaria, por suas saliências, protuberâncias e fissuras. Portanto, a trabalhabilidade é umas das propriedades que definem a produtividade e qualidade na aplicação da argamassa na obra.

Embora a argamassa de cimento seja considerada um material relativamente de baixa tecnologia, a ciência subjacente à sua trabalhabilidade permanece complexa. Existem dificuldades em caracterizar o trabalho mecânico que circunscreve a “trabalhabilidade” em um sentido abrangente e, dada a natureza composta da argamassa de cimento fresca, um método fundamental para medir essa propriedade transitória ainda não ganhou aceitação universal. No entanto, testes observacionais continuam sendo amplamente usados na cura de cimento para observar desenvolvimentos de propriedades mecânicas em macroescala. Os métodos de teste de trabalhabilidade mais comumente usados são baseados em metodologias empíricas (Justo-Reinoso *et al.*, 2019).

2.1.2. Aderência

A aderência de um sistema de revestimento cerâmico é umas das principais características que precisam ser avaliadas, pois vão garantir a durabilidade do revestimento após a aplicação.

A NBR 13528 (ABNT, 2019) define aderência como a propriedade do revestimento de resistir às tensões normais e tangenciais atuantes na interface com o substrato. Destaca ainda que a aderência não é uma propriedade exclusiva das

argamassas colantes, mas sim da interação entre as camadas do sistema de revestimento, sendo necessária a especificação do substrato que está sendo assentada a argamassa.

Os mecanismos de aderência da argamassa sobre substratos porosos podem ser identificados por quatro etapas distintas: primeiramente, durante a adesão inicial do substrato com a argamassa dando início à sucção capilar; a segunda etapa é identificada pelo transporte dos materiais finos para a interface como consequência do fluxo capilar; em sequência, as umidades do substrato e da argamassa entram em equilíbrio, por fim, ocorre a hidratação do cimento e formação de uma fase sólida coesiva entre a argamassa e o substrato (Faiyas *et al.*, 2019).

Segundo Carasek (1996), a aderência entre um substrato poroso e a argamassa ocorre através de um fenômeno essencialmente mecânico. No qual é caracterizado pela transferência de água que ocorre entre a argamassa e o substrato, promovendo a entrada da pasta de cimento nos poros do substrato, que através da hidratação ocorre a formação de hidróxidos e silicatos que promovem a ancoragem do revestimento.

Substratos com alta porosidade podem absorver grandes quantidades de água e provocar hidratação inadequada do cimento na argamassa, onde a quantidade de água que restou pode não ser suficiente para hidratar todo o cimento, formando regiões propícias ao deslocamento. Enquanto substratos pouco porosos a baixa absorção de água não permite a entrada da pasta que promove a ancoragem, prejudicando a aderência dos materiais (Pereira *et al.*, 2013; Zanelato, 2019).

Gado (2022) define o processo de hidratação do cimento em argamassas colantes como as reações químicas dos silicatos e aluminatos decorrente do incremento de água na mistura. Os polímeros utilizados se dispersam em água para formar filmes de látex, esse filme polimérico gerado atua como um aglutinante orgânico com o aglutinante primário de cimento, e a colagem das partículas de carga reforça a microestrutura da argamassa. Como resultado, este material compósito ou híbrido com desempenho geral aprimorado oferece excelente propriedade de adesão e deformabilidade (flexibilidade) na interface adesivo-substrato sob diferentes condições climáticas.

2.1.3. Capacidade de absorver deformações

A capacidade de absorver deformações é a principal propriedade que as argamassas devem apresentar para garantir que o revestimento cerâmico possa cumprir a vida útil ao qual foi projetado.

A capacidade de absorver deformações é uma propriedade da argamassa está inteiramente ligada a retenção de água pois representa a capacidade da argamassa reter a água de amassamento contra a sucção da base ou para a evaporação. A retenção permite que as reações de endurecimento da argamassa ocorram de forma gradual promovendo a boa hidratação do cimento e conseqüente ganho de resistência. Uma vez que, a rápida perda de água compromete a aderência, a capacidade de absorver deformações e resistência mecânica.

Segundo Azevedo *et al.*, (2018) para a argamassa apresentar adequada extensão de aderência sobre a superfície do substrato de alta absorção, a argamassa deve apresentar valores elevados de retenção de água, assim a água de amassamento necessária para hidratação do cimento não será absorvida pelo substrato, tornando a interface entre os materiais frágil. Enquanto para aplicação sobre substratos de baixa absorção, a argamassa deve apresentar baixa retenção de água, assim, o transporte de água da argamassa para o substrato não será comprometido, fundamental para aderência.

Contudo, a capacidade de absorver deformações precisa ser compatível com o nível de tensões gerados para que não ocorra prejuízos a sua funcionalidade. Sendo considerado um parâmetro mecânico que proporciona a medida da rigidez de um material e está associado com as propriedades mecânicas, como tensão de escoamento (em metais), tensão de ruptura, temperatura de propagação de trincas etc. É uma propriedade intrínseca dos materiais e depende da composição química, microestrutura e defeitos (poros e trincas). O módulo de elasticidade pode ser considerado como a relação entre a tensão aplicada sobre o concreto ou argamassa e a sua capacidade de suportar as deformações. Quanto maior o valor do módulo de elasticidade, menor a sua deformação e maior a sua capacidade de suportar cargas sem deformações definitivas.

2.2. ARGAMASSAS COLANTES

Segundo Fiorito (2010), anteriormente ao surgimento das argamassas colantes, o assentamento de placas cerâmicas era feito com argamassas

convencionais, sem uso de aditivos químicos, as quais eram confeccionadas nos próprios canteiros de obras. A camada de argamassa utilizada era de aproximadamente 20 mm de espessura, o que acarretava grandes perdas de água, tanto por sucção como por evaporação.

Ohama (1984) afirma que no Brasil a primeira argamassa colante surgiu em 1971 inspirada na *dry-set mortar*, que já vinha sendo empregada nos Estados Unidos, Europa e Japão. Essa definição ocorreu por ser uma mistura pronta, precisando, unicamente da adição de água.

Com o passar dos anos, e novas tecnologias sendo implementadas, as indústrias brasileiras passaram a produzir a argamassa colante em maior escala, fato que impulsionou nos anos 80 a necessidade de normatização específica. O Comitê Brasileiro de Cimentos, Concretos e Agregados, CB-18 da ABNT, iniciou os estudos para normatização das argamassas colantes em 1994, tendo sido os projetos de norma aprovados e publicados no ano de 1998, dando origem à ABNT NBR 14081 (1998) e ABNT NBR 14086 (1998) (Silva, 2003).

Fujii-Yamagata *et al.*, (2019) descreve que argamassas colantes consistem em uma mistura de cimento, areia e uma variedade de aditivos (éteres de celulose, incorporadores de ar, látex, etc.). Destaca que são materiais usados para colar ladrilhos na parede ou revestimentos cerâmicos aos substratos, incluindo concreto, betonilha, gesso ou reboco. Geralmente são aplicados em uma grande superfície com uma espátula dentada que garante que a espessura da camada seja a mesma em toda a área, e forma nervuras que permitem que o excesso de material seja distribuído quando o revestimento é pressionado contra a argamassa, ajudando assim a promover um bom contato entre o revestimento e a argamassa ao longo de toda a interface. Para obter um desempenho adequado na colocação dos revestimentos, as propriedades reológicas das argamassas devem manter um bom contato, mesmo após vários minutos de exposição às condições ambientais (tempo aberto) nas áreas internas ou externas da construção.

Segundo Modler *et al.*, (2021) as argamassas colantes são produtos industrializados, mais indicados para colagem de revestimentos cerâmicos. As argamassas são normalmente aplicadas em camadas finas e sob o substrato, e são a mistura de cimento, agregado miúdo e aditivos polímeros. Os polímeros são responsáveis por melhorar o comportamento reológico e o desempenho mecânico das

argamassas no estado fresco e endurecido, aumentando a flexibilidade, adesão, coesão e resistência à tração.

Segundo Inceoglu *et al.*, (2021) as argamassas colantes industrializadas podem ser utilizadas em superfícies de ambientes internos e externos para aplicação de revestimentos cerâmicos. Segundo os autores, as argamassas colantes contêm aproximadamente 20 - 40% de material cimentício, 60 - 80% de agregado miúdo e 1 - 10% de aditivos químicos, que atuam como agentes retentores de água, aceleradores ou retardadores de pega. Destaca ainda que, uma das propriedades mais importantes para o bom desempenho das argamassas colantes é a aderência à tração, com isso, compreender os efeitos do cimento e dos mecanismos de hidratação são fundamentais para as argamassas colantes.

O sistema de revestimento típico para argamassas colantes consiste em três elementos fundamentais, sendo eles, o substrato padrão, argamassa adesiva e revestimento cerâmico, conforme indicado na Figura 1:

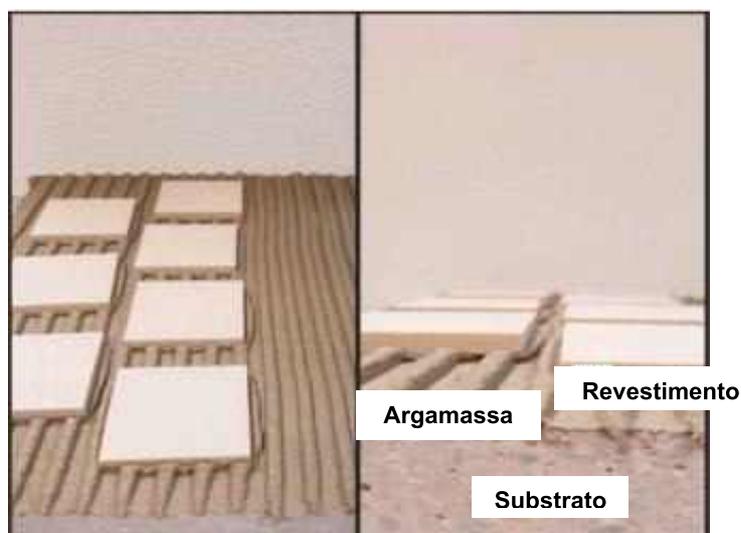


Figura 1: Sistema de revestimento típico (Adaptada INCEOGLU *et al.*, 2021)

A norma brasileira NBR 14081 (2012) define argamassa colante, quando seco, como um composto de cimento Portland, agregados minerais e aditivos químicos, que quando misturados com água, forma uma massa viscosa, plástica e aderente, empregada no assentamento de placas cerâmicas para revestimento.

Ainda de acordo com a NBR 14081 (2012) as argamassas colantes podem ser classificadas em:

- Argamassa colante industrializada tipo I – AC I: Argamassa colante industrializada com características de resistência às solicitações mecânicas e termo higrométricas, típicas de revestimentos internos, com exceção daquelas aplicadas em saunas, churrasqueiras, estufas e outros revestimentos especiais.

- Argamassa colante industrializada tipo II – AC II: Argamassa colante industrializada com características de adesividade que permitem absorver os esforços existentes em revestimentos de pisos e paredes internos e externos sujeitos a ciclos de variação termo higrométricas a à ação do vento.

- Argamassa colante industrializada tipo III – ACIII: Argamassa colante industrializada que apresenta aderência superior em relação às argamassas tipo I e tipo II.

A NBR 14081 (2012) especifica valores de resistência de aderência à tração maior ou igual a 0,5 MPa para assentamento de cerâmicas na vertical para argamassas AC I, AC II, e para as argamassas AC III maior ou igual a 1,0 MPa conforme Tabela 2.

Tabela 2: Propriedades fundamentais das argamassas colantes (ABNT 2012)

| Requisito | | Método de ensaio | Unid. | Critério | | |
|--|----------------|---------------------|-------|----------|-------|--------|
| | | | | AC I | AC II | AC III |
| Tempo em aberto | | ABNT NBR 14081-3/12 | min | ≥ 15 | ≥ 20 | ≥ 20 |
| Resistência de aderência à tração aos 28 dias, em função do tipo de cura | Cura normal | ABNT NBR 14081-4/12 | MPa | ≥ 0,5 | ≥ 0,5 | ≥ 1,0 |
| | Cura submersa | | | ≥ 0,5 | ≥ 0,5 | ≥ 1,0 |
| | Cura em estufa | | | | ≥ 0,5 | ≥ 1,0 |

A NBR 14081 (2012) acrescenta ainda que cada uma das classes pode ser classificada em ACI-E ou D, ACII-E ou D ou ACIII-E ou D. Opcionalmente verifica-se as propriedades da Tabela 3, considerando aplicações especiais.

Tabela 3: Propriedades opcionais das argamassas colantes (ABNT, 2012)

| Requisito | Método de ensaio | Critério |
|--|-------------------------|--|
| Tempo em aberto estendido (E) | ABNT NBR 14081-3/12 | Argamassa do tipo I, II, III com tempo em aberto estendido no mínimo 10 min, além do especificado como propriedade fundamental |
| Deslizamento reduzido (D) | ABNT NBR 14081-4/12 | Argamassa do tipo I, II, III com deslizamento menor ou igual a 2 mm |
| As siglas "E" e "D" relativas respectivamente às propriedades opcionais de "tempo em aberto estendido" e "deslizamento reduzido", devem estar marcadas nas embalagens das argamassas colantes destinadas a atender a tais propriedades | | |

2.3. ADITIVOS QUÍMICOS PARA PRODUÇÃO DE ARGAMASSAS COLANTES

Os aditivos são componentes importantes nas argamassas, possuem a capacidade de alterar suas propriedades no estado fresco e endurecido. Ainda que sejam divididos em várias categorias, os aditivos possuem dois objetivos fundamentais, o de ampliar a qualidade da argamassa, ou minimizar seus pontos fracos.

Segundo Kurklu *et al.*, (2019) os aditivos químicos são usualmente utilizados para melhorar a propriedades de incorporação de ar e retenção de água das argamassas colantes.

A adição de aditivos químicos em argamassas influencia diretamente na trabalhabilidade das argamassas colantes, uma vez que são responsáveis por alterar as propriedades de viscosidade, plasticidade, coesão, consistência, adesão inicial e retenção de água. Dentre os aditivos mais utilizados, destacam-se os hidróxietil celulose (HEC) e metil-hidróxietil celulose (MHEC), sendo os mais empregados nas argamassas colantes, tendo-se ainda o PVA (polivinil álcool).

O HEC tem como principal propriedade a retenção de água, é um polímero de de celulose natural modificada produzido pela eterificação parcial de alguns grupos hidroxila da celulose como a álcali celulose, que, por sua vez, reage com o óxido de etileno para a formação do HEC. O HEC aumenta a plasticidade e a coesão da argamassa, evitando o deslizamento da placa cerâmica, deixando a argamassa mais

trabalhável e retarda os tempos de pega que ampliam o tempo em aberto (Póvoas, 1999).

Segundo Fujii-Yamagata *et al.*, (2019) os aditivos a base de HEC são um dos principais aditivos utilizados em argamassas colantes devido ao seu efeito espessante e à capacidade de retenção de água, importantes para as propriedades da argamassa fresca. Ainda segundo o autor, a adição de HEC tende a melhorar a trabalhabilidade, garantir a pegajosidade e prolongar o tempo aberto. Maior incorporação de ar e estabilização de bolhas podem melhorar a trabalhabilidade e a eficiência. O seu efeito espessante melhora a pegajosidade com o ladrilho. Um efeito de retenção de água é importante para manter água suficiente para a hidratação e permitir um tempo aberto mais longo.

O PVA por sua vez, aumenta a resistência à compressão, à flexão e de aderência, além de reduzir a permeabilidade da argamassa. O PVA envolve os grãos do cimento, tornando a argamassa mais densa e homogênea, aumentando sua flexibilidade e plasticidade, e pelo fato de possuir protetor coloidal em sua composição, retém água, retardando a formação superficial de uma “película”, a qual impede a aderência da placa à pasta da argamassa. (Póvoas, 1999).

2.4. PRODUÇÃO DE ROCHAS ORNAMENTAIS NO BRASIL

A Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, NBR 15012 (2003), define rocha ornamental como: material rochoso natural, submetido a diferentes graus ou tipos de beneficiamento, utilizado para exercer uma função estética. A rocha para revestimento corresponde à rocha natural que, submetida a processos diversos de beneficiamento, é utilizada no acabamento de superfícies, especialmente pisos, paredes e fachadas, em obras de construção civil.

As rochas ornamentais são um dos materiais mais importantes utilizados desde a antiguidade, especialmente para fins decorativos e estruturas permanentes como pirâmides e monumentos (Barreto *et al.*, 2020).

Segundo Leite *et al.*, (2021) de 2015 a 2019 o Brasil manteve a quinta posição no ranking de produtores mundiais de rochas ornamentais, representando cerca de 5 a 6% da produção mundial, que corresponde a aproximadamente 8,2 milhões de toneladas por ano.

Segundo a Abirochas (2023) as exportações brasileiras deste último ano totalizaram US\$ 1.284,9 milhões (-4%) e 2,1 milhões t (- 12,8%), frente US\$ 1.338,0 milhões e 2,4 milhões t em 2021. Esses números reenterram que flutuações episódicas do desempenho das exportações são determinadas por eventos políticos e fatores mercadológicos globais. O forte incremento de 2021 lastreou-se no gigantesco pacote de incentivos financeiros aportados como política anticíclica pelas economias desenvolvidas, especialmente dos EUA, para fazer frente aos impactos negativos decorrentes da pandemia em 2020 e 2021. O recuo observado em 2022, por sua vez, sugere a instalação de novas condicionantes, agora negativas, relacionadas aos desdobramentos da guerra na Ucrânia e à instabilidade gerada na economia mundial, apontando para um indesejável, porém possível, cenário de recessão ou no mínimo de “pouso suave”.

Vale ressaltar que mesmo ocorrendo um recuo no número de exportações no último ano, o valor da produção brasileira de rochas ornamentais continua muito expressivo frente ao cenário mundial. Principalmente entre as produções dos estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro e Espírito Santo.

No primeiro trimestre de 2023, segundo a Abirochas (2023) o estado do Espírito Santo foi o principal exportador de rochas ornamentais, com um faturamento de US\$ 177,5 milhões, seguido pelo estado de Minas Gerais com US\$ 25,3 milhões. A produção do estado do Espírito Santo respondeu por 79,3% do faturamento brasileiro com a indústria de rochas de ornamentais.

Na designação comercial das rochas ornamentais e de revestimento, os termos utilizados para indicação do tipo de rocha estão associados a três grupamentos litológicos composicionais: os das rochas silicáticas, o das rochas carbonáticas e o das rochas silicosas (ABIROCHAS, 2018).

As rochas silicáticas são aquelas formadas por proporções variáveis de minerais silicáticos (feldspatos, micas, anfibólios etc.) e silicosos (quartzo), ou apenas silicáticos, abrangendo os materiais comercialmente classificados ou identificados como granito, pegmatito (“feldspato”), xisto.

As rochas carbonáticas são aquelas formadas por proporções variáveis de calcita, dolomita e outros carbonatos, podendo conter subordinadamente minerais silicáticos e/ou silicosos. Este grupo de rochas inclui o que comercialmente se classifica como mármore, travertino, limestone (calcário), ônix (mármore ônix) e alabastro.

As rochas silicosas são aquelas essencialmente formadas por quartzo e/ou sílica amorfa, com quantidades subordinadas de minerais silicáticos e/ou carbonáticos, abrangendo os materiais comercialmente classificados como quartzito, metaconglomerado e quartzo (o verdadeiro quartzo natural e não o produto composto artificialmente).

A produção brasileira de rochas ornamentais inclui diversos tipos de materiais como, granitos, pegmatitos e várias outras rochas silicáticas, além de mármore, travertinos, ardósias, quartzitos maciços e foliados, basaltos e gabros, serpentinitos, pedrasabão e pedra-talco, calcários, metaconglomerados polimíticos e oligomíticos, cherts, arenitos, xistos diversos, etc. Assume-se a existência de pelo menos 1.500 frentes ativas de lavra, sempre a céu aberto e quase sempre em maciços, responsáveis por mais de 1.200 variedades comerciais de rochas colocadas nos mercados interno e externo (ABIROCHAS, 2018).

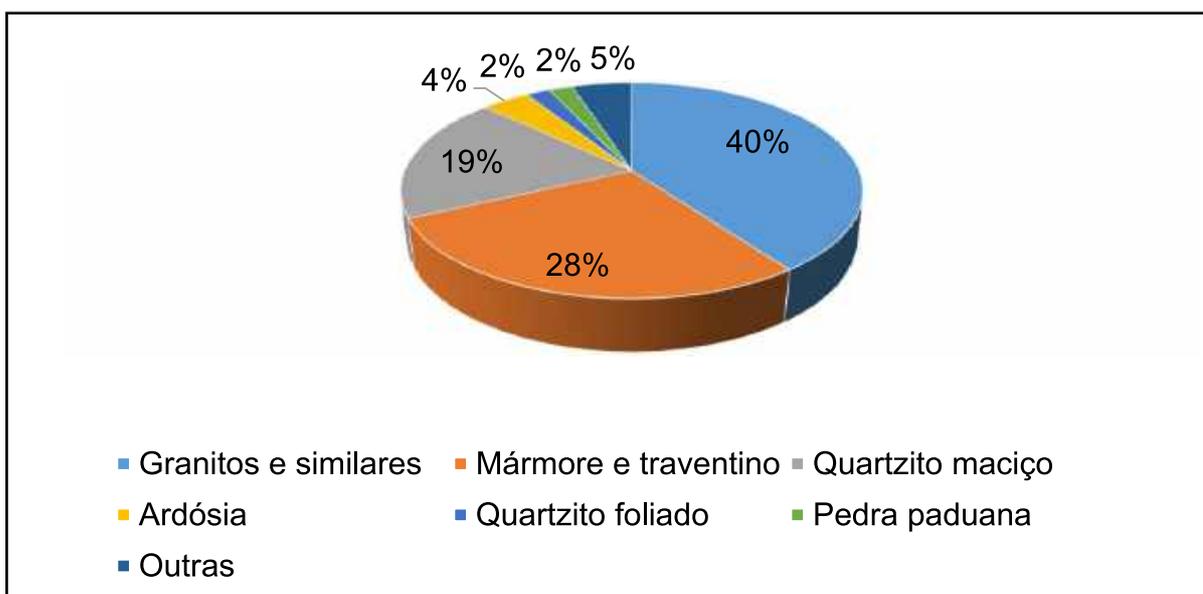


Figura 2: Perfil da produção brasileira por tipo de rocha em 2022 (Adaptada de ABIROCHAS)

O perfil da produção anual brasileira referente ao ano de 2022 é mostrado na Figura 2. Através do perfil da produção brasileira, observa-se que os materiais comercialmente classificados como mármore e granitos correspondem a aproximadamente 70% do total produzido no ano de 2022.

É apresentado na Tabela 4 o perfil da produção por regiões brasileiras, com o intuito de expor o cenário atual da distribuição da indústria de rochas ornamentais e sua representatividade na economia de cada região.

Tabela 4: Perfil da produção brasileira por região (ABIROCHAS, 2023)

| Distribuição estadual da produção de rochas ornamentais no Brasil - 2022 | | | | |
|---|-------------------------|-----------------|---------------------------|--|
| Região | Participação (%) | UF | Produção (1.000 t) | Tipo de Rocha |
| Sudeste | 49,5% | Espírito Santo | 2.800 | Granito e mármore |
| | | Minas Gerais | 1.900 | Granito, pegmatito, ardósia, quartzito foliado, quartzito maciço, pedra-sabão, mármore |
| | | RJ e SP | 250 | Granito, mármore, gnaisse (Pedra Paduana) e arenito |
| Nordeste | 42,5% | Bahia | 1.800 | Granito, pegmatito, mármore, travertino, quartzito maciço |
| | | Ceará | 1.300 | Granito, pegmatito, calcário, mármore |
| | | Paraíba | 450 | Granito e conglomerado |
| | | PE, AL, RN e PI | 700 | Granito, quartzito, mármore, calcário |
| Sul | 5,0% | PR RS e SC | 500 | Granito, mármore, basalto, ardósia (folhelho) |
| Centro-Oeste | 2,0% | GO, MT e MS | 200 | Granito, quartzito foliado, serpentinito, mármore |
| Norte | 1,0% | RO, RR, PA e TO | 100 | Granito, anortosito, chert, serpentinito |
| Total Brasil | | | 10.000 | |

De fato, a indústria de rochas ornamentais possui uma parcela importante na economia brasileira, sendo responsável pela geração de grande quantidade de empregos diretos e indiretos, além de desenvolver a economia local onde as indústrias estão instaladas.

O sudeste brasileiro possui diversas atividades econômicas, como agricultura, pecuária, construção civil, industriais siderúrgicas e de petróleo, entre outras. No entanto, possui um papel de destaque na produção de rochas ornamentais, somente no ano de 2022 foi responsável por aproximadamente 50% da produção brasileira.

Alencar (1996) destaca que apesar do Brasil apresentar vários tipos de materiais, os exóticos e raros são os que alcançam valores mais elevados no mercado internacional. Entretanto tais materiais têm como agravante o fato de apresentar

problemas durante de garantia de fornecimento e de manutenção tanto dos níveis condizentes com a demanda como dos padrões de qualidade visto que, a grande parte dessas rochas é extraída de matacões. Esse fato se remete ao início do século passado, onde a extração baseava-se na utilização de perfuração e do explosivo, técnica sem nenhum tipo de planejamento.

Com o desenvolvimento de novas técnicas de beneficiamento as rochas ornamentais podem ser aproveitadas nos diversos ambientes, em virtude de sua infinita utilização, explorando a combinação de suas qualidades estruturais e estéticas. Ainda segundo Alencar (1996) os campos de aplicação podem ser divididos em quatro grupos principais:

- Arquitetura e construção – grupo mais representativo, pois mobiliza maior volume de produtos e valor no mercado mundial;
- Construção e Revestimentos de Elementos Urbanos – pavimentação de vias para veículos e pedestres, de praças, parques, calçadas, meios-fios, etc.
- Arte funerária – construção e ornamentação de túmulos e
- Arte e Decoração – esculturas, estátuas, bancadas de pia, etc.

Embora exista uma grande diversidade de aplicações, o processo produtivo pelo qual a rocha ornamental é submetida apresentam semelhanças em relação aos recursos tecnológicos e o ciclo de produção.

A produção de rochas ornamentais é dividida em quatro etapas distintas. A extração, realizada nas pedreiras, onde o matacão é cortado em bloco de rocha, o desdobramento, onde ocorre a serragem dos blocos em chapas, o polimento responsável por dar o acabamento nas chapas, e por fim, as chapas são vendidas para as marmorarias que executam os mais diversos trabalhos (Silva, 2011).

É apresentado na Figura 3 o fluxo do processo produtivo das rochas ornamentais, dividido entre as principais etapas que circunscrevem a produção, como extração, corte e polimento. Destaca ainda, o perfil do material produzido em cada uma das etapas para descarte.

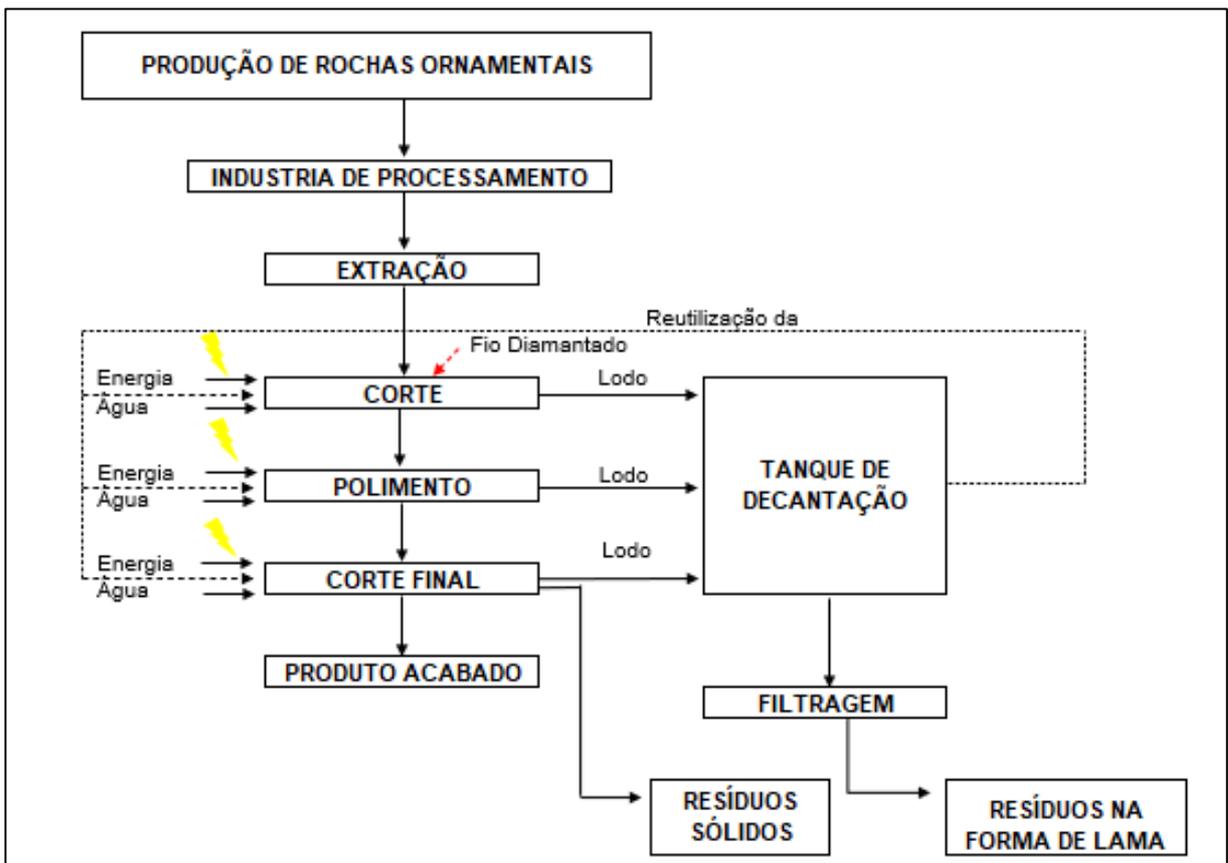


Figura 3: Processo de fabricação de rochas ornamentais (Adaptado de Faria *et al.*, 2017)

2.4.1. Extração

A extração é considerada a primeira etapa do processo produtivo de rochas ornamentais. Essa atividade consiste na retirada do material rochoso útil e economicamente aproveitável dos maciços rochosos ou dos matacões para comercialização. O produto obtido durante essa etapa, são blocos de geometria retangulares, de diferentes dimensões, que procuram obedecer ou aproximar se, tanto quanto possível, daquelas que proporcionem o melhor aproveitamento do material e a maior utilização da capacidade produtiva dos equipamentos nas etapas de beneficiamento.

O processo para obtenção das rochas ornamentais obedece a algumas fases para a sua execução. As principais delas são:

- prospecção para localização ou identificação da ocorrência mineral de rocha ornamental;

- pesquisa mineral para avaliação do potencial de aproveitamento da jazida e para levantar dados e informações que permitam fazer o melhor planejamento da lavra;
- lavra, que é a atividade produtiva da extração desenvolvida aplicando-se metodologias apropriadas às características do material e da formação geológica da jazida, e por último;
- recuperação da área degradada.

Sendo assim, o primeiro passo da produção de rochas ornamentais é a prospecção e pesquisa sobre a localização de áreas com rochas potencialmente viáveis do ponto de vista tecnológico, logístico e de mercado (Figura 4).



Figura 4: Produção de lavra (ABIROCHAS, 2019)

Segundo a ABIROCHAS (2017), as atividades de lavra em uma jazida não são interrompidas pela ausência de material, mas pela possibilidade de não obter blocos com aparência e dimensões que permitam a serragem de peças aceitáveis no mercado.

Existem vários métodos de lavra das rochas, com rendimentos e eficiência variáveis, em virtude de aplicação das tecnologias mais adequadas, dentre as existentes, de acordo com as condições geológicas e estruturais, acarretando, com isso, variações acentuadas nos custos operacionais da extração. O método mais utilizado no Brasil é o de lavra de maciço em bancadas altas, e esse combinado com

o de painéis verticais, embora existam exemplos de todos os outros. A principal tecnologia de extração é o corte com fio diamantado, tanto para cortes primários, o isolamento de grandes volumes de rocha do maciço, quanto para secundários, a subdivisão desses volumes em pranchas é muitas vezes para o esquadreamento de blocos, que é o corte das pranchas em blocos de rocha de volumes de 9 a 12 m³, tamanho necessário para poder produzir chapas polidas no beneficiamento (Vidal *et al.*, 2014).

2.4.2. Beneficiamento

O processo de beneficiamento consiste na etapa de serragem ou desdobramento do bloco. Nesta etapa, os blocos obtidos durante a extração são transformados em produtos semiacabados.

Segundo Bacarji *et al.*, (2023) após a extração dos blocos, ocorre o processo de beneficiamento do material, sendo feito o corte do material com teares. E destaca que é durante a serragem nos teares que é gerado uma pasta que contém restos abrasivos, composta por água, partículas de ferro, cal e rocha moída. Depois de passar pelo tear, estima-se que 20 a 30% do bloco é convertido em lodo, que é drenado para os poços de decantação e posteriormente descartado em aterros sanitários.

Segundo Faria (2016) o beneficiamento dos blocos é dividido nas fases primário, ou desdobramento, e secundário. O beneficiamento primário é a etapa em que os blocos são cortados em chapas ou tiras, com espessuras próximas aos dos produtos finais. No entanto, na etapa de beneficiamento final as peças adquirem forma, dimensões e aparência de como serão comercializados.

Durante a serragem, ocorre o corte dos blocos em teares para obtenção de chapas com espessura de 2 cm. Segundo a ABIROCHAS (2019) são utilizados os teares multilâminas de aço e teares multifios diamantados para realizar corte e tornar peças em dimensões comerciais, conforme ilustrado na Figura 5.



Figura 5: a) Teares multilâminas de aço. b) Teares multifios diamantados

É durante a fase de beneficiamento de rochas ornamentais, que são produzidas as maiores quantidades de resíduos em forma de uma lama formada por pó de pedra, cal, água e granalha metálica e pó de pedra com retalhos de rochas (Destefani, 2009). A lama abrasiva é formada pela união de água usada para refrigerar as máquinas de beneficiamento de rochas e abrasivos como a granalha metálica que, ao ser adicionado em maior quantidade, acelera o processo de serragem dos blocos de rochas. O pó é produzido durante o processo de corte e polimento.

Os resíduos oriundos desse processo são geralmente armazenados em pátios ao redor de empresas ou armazéns temporários, causando degradação ambiental como contaminação dos mananciais e do solo, além da ocupação de espaços nos pátios das fábricas. (Faria, 2016).

2.5. PRODUÇÃO DE RESÍDUOS DO BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS

O Brasil é responsável pela produção de diversos tipos de rochas ornamentais, no entanto, a produção de mármore e granitos correspondem a aproximadamente 70% da produção brasileira.

O mármore é uma pedra natural formada pela recristalização do calcário (CaCO_3) e dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) em uma nova estrutura. O pó de mármore é produzido durante a mineração que envolve o processo de corte, polimento e acabamento para obter a espessura comercial. Na conversão de blocos de mármore em blocos acabados, é estimado que cerca de 35 a 40% da massa original do

mármore é perdida nas formas de resíduos como pó de mármore e lodo de mármore e que esses resíduos são despejados em terrenos abertos. (Ror *et al.*, 2022).

Segundo Nayak *et al.*, (2022) durante o processo de extração, serragem e polimento dessas rochas para comercialização, ocorre a formação de uma enorme quantidade de resíduos tóxicos que são lançados a céu aberto. O autor relatou em sua pesquisa que cerca de 30 a 40% dos blocos de mármore extraídos são transformados em lodo durante o processamento.

Os resíduos sólidos gerados durante o processo de beneficiamento de rochas, possui em sua constituição principalmente, alumínio, silício, ferro, manganês, cálcio, potássio e sódio, bem como outros elementos alcalinos. Estima-se que no Brasil são gerados anualmente 4,5 Mt de resíduos sólidos de rochas ornamentais, principalmente nos estados do Espírito Santo, Minas Gerais e Rio de Janeiro (Barreto *et al.*, 2020).

Segundo Leite *et al.*, (2021) na fase de acabamento das rochas ornamentais para comercialização no Brasil, estima-se que possa ser gerado cerca de 17.500 kg de resíduo por semana, o que representa 18% do peso da laje da rocha ornamental. Ainda segundo o autor, foi identificado que no ano de 2017 no país existiam 6.000 marmorarias.

Kushwaha *et al.*, (2022) estima que cerca de 30% das pedras de rochas ornamentais são desperdiçadas como fragmentos de rochas durante a produção e transporte. E que devido à ausência de mecanismos de descarte adequados, esses resíduos são depositados a céu aberto nos arredores das fábricas, acabando por degradar a terra natural e os corpos d'água.

Para Vital *et al.*(2014) o beneficiamento das rochas ornamentais que ocorre nas serrarias é responsável por uma grande de resíduos, sendo considerado que o beneficiamento primário ocasione a geração de 40% do volume do bloco processado, o que corresponde a 26% de resíduo muito fino misturado com os insumos da serragem e 14% de resíduo grosso, na forma de casqueiro.

A Associação Brasileira de Rochas Ornamentais estima que durante o beneficiamento das rochas ornamentais, o percentual de resíduos gerado pode alcançar o valor estimado de 41%. Esse fato, corrobora com os valores encontrados na literatura, o que representa um valor considerável frente ao número da produção brasileira (ABIROCHAS, 2019).

Como grande parte desses resíduos não possui uma destinação definida em outros segmentos da indústria, esse rejeito se torna uma problemática para os produtores em decorrência dos impactos ambientais que podem causar meio ambiente e a sociedade.

2.6. INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE ROCHAS ORNAMENTAIS EM MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

Ror *et al.*, (2022) destacaram em sua pesquisa que o resíduo de mármore pode ser empregado em diversas áreas da indústria como material substituto as matérias-primas convencionais:

- Pó de mármore pode ser utilizado de forma lucrativa em grandes quantidades na construção de camadas de pavimento de estradas e em aterros;
- Para a fabricação de tijolos, pois é quimicamente dolomítico por natureza e consiste em partículas muito finas;
- Utilizar o resíduo de mármore como substituto parcial do cimento ou areia no concreto convencional apenas como material de enchimento porque, de acordo com os resultados, não participa do processo de hidratação;
- Resíduos de pó de mármore podem ser utilizados como matéria-prima para a produção de revestimentos cerâmicos;
- Resíduos de pó de mármore podem ser adicionados parcialmente em compósito de matriz metálica.

Bentlemsan *et al.*, (2022) estudaram a substituição da areia natural por resíduos do beneficiamento do mármore para a produção de argamassas autoadensáveis. As proposições de substituição utilizadas para o desenvolvimento da pesquisa foram, 10%, 15%, 30%, 50%, 75% e 100%. Foram investigadas pelos autores o ataque ao sulfato, durante o período de 1 mês, 2 meses, 4 meses e 6 meses de imersão em solução de $MgSO_4$. Os resultados do programa experimental, indicam que a incorporação do resíduo aumentou a trabalhabilidade da argamassa. O percentual de substituição de 30% do resíduo do mármore melhorou a resistência à compressão e à flexão das argamassas autoadensáveis, principalmente aos 90 dias, a resistência à compressão aumenta em 8% e a resistência à flexão em 17%. Foi possível concluir que em teores de substituição acima de 30% ocorre o aumento de porosidade da argamassa autoadensável. Foi observado que a presença do resíduo

limitou a penetração de sulfatos na argamassa. Contudo, esse fato pode ser explicado pelo efeito de enchimento do mármore, que gera um efeito de enrolamento entre os grãos.

Sánchez *et al.*, (2019) estudaram a viabilidade da utilização de resíduos da indústria do mármore como aditivo ao cimento branco Portland de alto desempenho, variando as porcentagens de substituição do clínquer por resíduos de mármore. Foram avaliadas as classes de resistência CEM 32,5 N e 42,5 N. Foram confeccionadas misturas de pó de mármore e clínquer nas porções de 0%, 5%, 10%, 15%, 20% e 25%, variando a porcentagem de pó de mármore adicionado ao volume total de clínquer na mistura cimentícia. Os resultados da análise mineralógica e das análises físico-química confirmaram a viabilidade do pó de mármore como subproduto na produção do cimento Portland. Os resultados do ensaio de resistência a tração na flexão da argamassa produzida com o cimento indicaram que não houve variação entre os valores obtidos entre a amostra de referência e as argamassas produzidas com o cimento contendo de 5% e 10% de substituição. A maior resistência a compressão obtida na argamassa produzida foi na porção de 10% de substituição conforme indicado nas Figuras 6 e 7 a seguir. Por fim, foi comprovado a viabilidade técnica da utilização do cimento produzido com a substituição do clínquer pelo resíduo de mármore e o melhor teor de substituição foi obtido na porção de 10%.

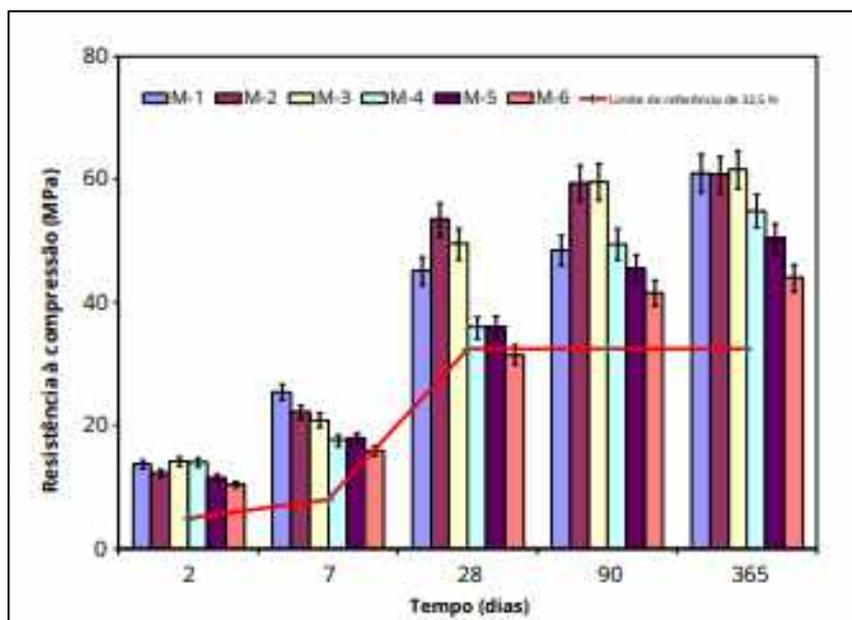


Figura 6: Comparação da amostra com valor de referência de 32,5 N (Sánchez et al., 2019)

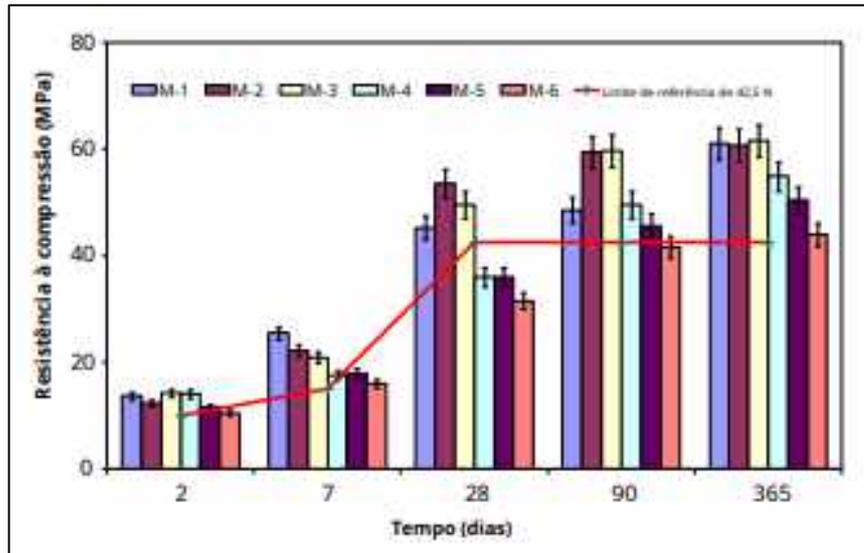


Figura 7: Comparação da amostra com limite de referência de 42,5 N (Sánchez et al., 2019)

Silva *et al.*, (2021) estudaram a viabilidade da utilização de resíduo de quartzito na produção tijolos cerâmicos, foram confeccionados de acordo com as seguintes variáveis: porcentagem de substituição da massa cerâmica pelo de resíduo de rocha ornamental nas porcentagens de 10% e 15%, pressão de compactação (28 e 35 MPa), temperatura de secagem (65-C por 72 h e 110-C por 24 h) e temperatura de queima (950 e 1100-C). Os ensaios de características físico-químicas indicaram um potencial da utilização do resíduo, como material substituinte da massa cerâmica. Os testes tecnológicos avaliaram a retração linear de secagem e queima, peso específico de queima, absorção de água e resistência à compressão uniaxial e as condições ótimas para a confecção de tijolos cerâmicos foram obtidas na porcentagem de substituição de 15%, pressão de compactação de 35 MPa, temperatura de secagem de 65-C (72 h), e temperatura de queima de 1100-C.

Vardhan *et al.*, (2015) estudaram o efeito da substituição parcial do cimento por resíduo de mármore em argamassas cimentícias em teores de 10%, 20%, 30%, 40% e 50%. Foram avaliadas as propriedades de trabalhabilidade, resistência à compressão e microestrutura das misturas. Os autores concluíram que é possível utilizar o resíduo de mármore em substituição ao cimento em até 10% sem diminuição da resistência à compressão, e ainda com melhora da trabalhabilidade da mistura. Para teores maiores que 10% há decréscimo na resistência à compressão das misturas, possivelmente explicada pela elevação na porosidade das argamassas com

substituição do cimento por resíduo de mármore, observada na avaliação da microestrutura.

Buyuksagis *et al.*, (2017) estudaram a viabilidade da utilização de resíduo de mármore em substituição parcial a dolomita em argamassas colantes nas porcentagens de 20%, 40%, 60%, 80% e 100%. Os ensaios mecânicos apresentaram valores de resistência a tração e a compressão dentro do estipulado pela norma, no entanto, as maiores resistências das argamassas foram obtidas nas porcentagens de 20% e 40% conforme indicado na Figura 8. Os autores concluíram que o valor ideal de substituição para a argamassa ensaiada pelo a substituição de 40%. Foi observado também pelos autores que à medida que o pó de mármore era adicionado a argamassa os valores de absorção de água também aumentavam em virtude do aumento de grãos de finos na argamassa.

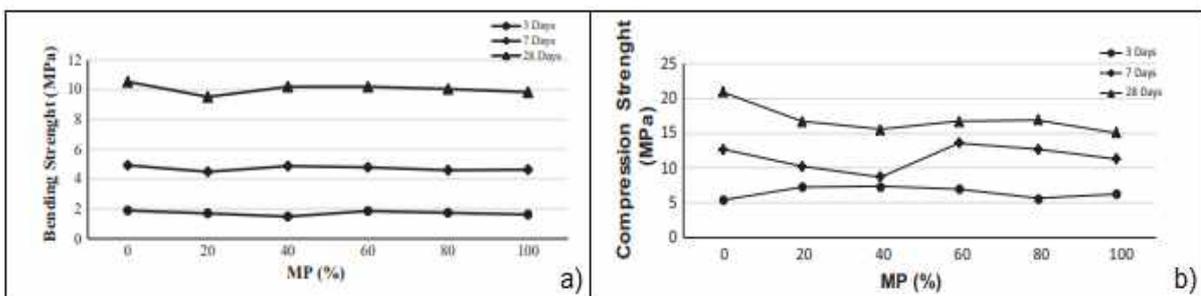


Figura 8: a) Resistência a tração MPa e b) Resistência a compressão MPa (Buyuksagis *et al.*, 2017)

Gado (2022) estudou a potencial utilização de lamias de mármore e granito na produção de argamassas cimentícias modificadas por polímeros. Várias formulações de argamassas foram confeccionadas nas porcentagens de 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30% de substituição da areia pelos resíduos. Os ensaios de caracterização do resíduo indicaram que lamias dos resíduos são compostas principalmente por minerais de calcita e quartzo, com tamanho médio de partícula de 4,86 μm . Os resultados também mostraram que a incorporação dos resíduos na argamassa melhora a trabalhabilidade, e, desempenho e força de adesão da formulação de argamassa adesiva cimentícia modificada com polímero preparada ao utilizar a porcentagem ótima de adição de lodo entre a porcentagem na faixa de 10 a 15% conforme Figura 9.

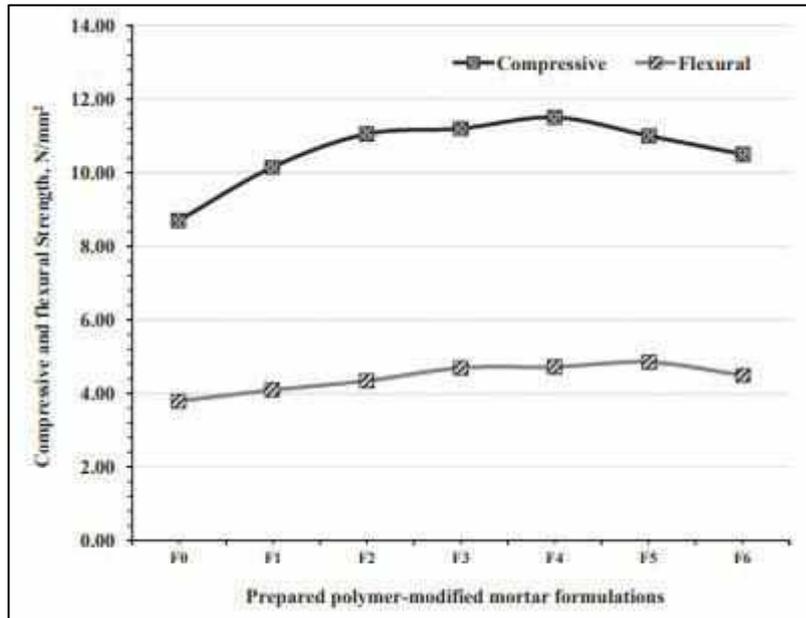


Figura 9: Resistência à compressão e flexão das formulações de argamassa modificada com polímero (Gado, 2022)

Oggu *et al.*, (2022) estudaram a produção de concreto poroso utilizado nas pavimentações de concreto com a substituição parcial do cimento pelo pó de mármore e adição de água com uma fração de 40% a 60% de Aloe Vera. As proporções do cimento pelo resíduo foram de respectivamente 10%, 30%, 50% e 70%. Os resultados de resistência a tração e a compressão ilustrados na Figura 10 indicaram que a substituição do cimento pelo resíduo do pó de mármore contribuiu para o ganho de resistência nas substituições até 30%. Foram identificadas pelos autores que não houve perda na permeabilidade no concreto e que a substituição ideal é de até 30%.

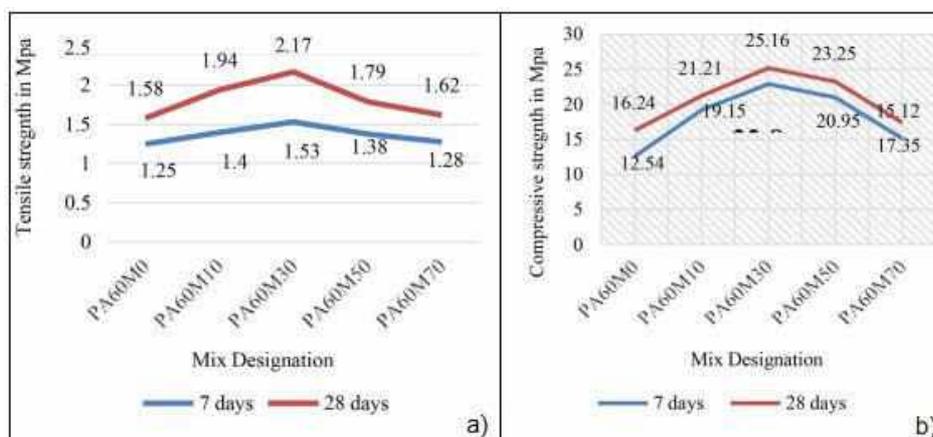


Figura 10: Resistência a tração (em Mpa) e b) Resistência a compressão (em Mpa) (Oggu *et al.*, 2022)

Pereira *et al.*, (2022) avaliou o potencial a utilização de resíduos oriundos do processo de beneficiamento de rochas ornamentais para produção de concretos autoadensáveis. Relatam que esses materiais vêm sendo utilizados em diversas pesquisas como agregados miúdos ou como substituto de uma parcela do cimento. Esse material, possui uma característica que quando em matrizes cimentícias atuam como material de enchimento inerte, que produz o preenchimento dos poros. O efeito filler pode acelerar a hidratação do cimento e melhorar a zona de transição na interface pasta/agregado. Desta ainda que o efeito filler pode melhorar a estrutura dessa zona e influenciar no empacotamento e estabilidade das matrizes. No entanto, destacam que o incremento em grandes quantidades pode prejudicar o desempenho do compósito.

Conforme observado, a utilização de resíduos provenientes do beneficiamento de diversos tipos de rochas ornamentais vem sendo estudado ao longo dos anos, é observado o potencial da sua utilização como material constituinte na produção de argamassas, concretos, tijolos entre outros. Uma característica importante desse tipo de material é uma característica física, ou seja, um material de granulometria fina que quando utilizado na confecção de diversos produtos contribui para o desempenho das propriedades mecânicas dos materiais e conseqüentemente no seu desempenho.

3. METODOLOGIA

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Os materiais que foram utilizados no desenvolvimento desta pesquisa estão listados a seguir:

3.1.1. Cimento Portland CP V – ARI

Para o desenvolvimento do programa experimental, foi escolhido o cimento Portland de alta resistência inicial (CP V – ARI) de acordo com a ABNT NBR 16697 (2018). Além de possuir a particularidade de atingir altas resistências já nos primeiros dias de sua aplicação, a escolha desse tipo de cimento se deu por conter menor teor de adições entre os disponíveis no mercado nacional, possibilitando melhor avaliação dos resultados com incorporação dos resíduos.

Todo o cimento utilizado nesta pesquisa foi proveniente do mesmo lote de fabricação e marca a fim de não alterar sua composição química e mineralógica, podendo interferir nos resultados dos ensaios.

3.1.2. Aditivos Químicos

Os aditivos químicos utilizados para o desenvolvimento desta pesquisa foram o éter de celulose (HEC) e o polivinil álcool (PVA).

Ambos os materiais foram utilizados com o objetivo de melhorar o desempenho das argamassas colantes no estado fresco e endurecido.

3.1.3. Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado para o desenvolvimento das argamassas foi a areia natural e lavada do Rio Paraíba do Sul em Campos dos Goytacazes – RJ e passada na peneira #16 (1,18 mm), sendo caracterizada de acordo com a NBR 17054 (ABNT, 2022b) como areia média.

3.1.4. Água

A água utilizada nesta pesquisa é proveniente da rede pública de Campos dos Goytacazes – RJ, sendo recolhida do Rio Paraíba do Sul tratada e distribuída pela concessionária Águas do Paraíba.

3.1.5. Resíduo de rocha ornamental

O resíduo de rocha ornamental utilizado para o desenvolvimento desta pesquisa foi proveniente da empresa Santa Alice Granitos, localizada no município de Cachoeiro do Itapemirim, estado do Espírito Santo (Figura 11).

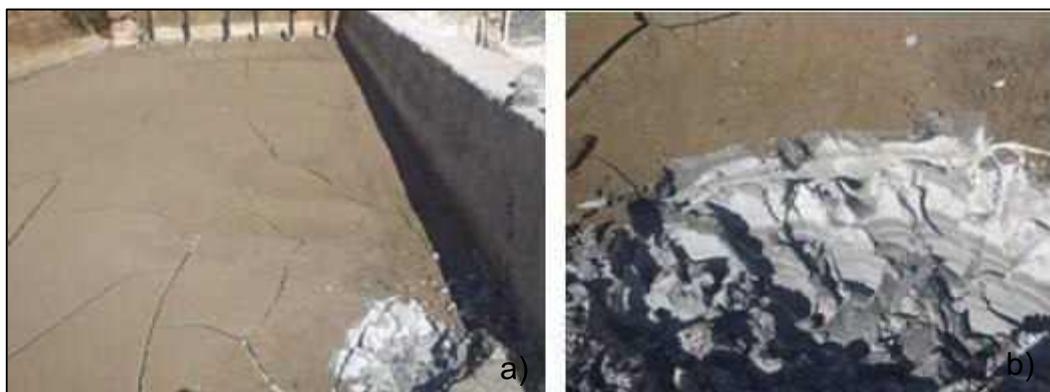


Figura 11: a) e b) Poço de decantação onde o resíduo foi retirado (Próprio autor)

3.1.6. Confeção de Substrato Padrão

Para a execução dos ensaios de tempo em aberto e resistência a aderência à tração, é necessário a utilização de substratos para fixação das peças cerâmicas para posterior execução dos ensaios.

Com isso, foram confeccionadas 12 unidades de substrato padrão com as seguintes dimensões 25 x 50 cm e espessura de 20mm, seguindo os procedimentos indicados na NBR 14081-2 (ABNT, 2015). Onde foram utilizados os seguintes materiais: tela de aço eletrossoldado, areia, pedrisco e cimento, com relação água/cimento 0,45 a 0,5, consumo mínimo de cimento de 400 kg/m³ e traço em massa igual a 1:2,6:1,3. Todos esses dados são fornecidos pela norma.

Os moldes metálicos nas dimensões utilizados para a execução dos substratos foram do laboratório do LECIV/UENF conforme Figura 12.



Figura 12: Forma metálica utilizada para confecção dos substratos

Logo após a montagem das peças dos moldes, os mesmos foram limpos e aplicado óleo desmoldante com o objetivo de facilitar a remoção das placas após a secagem do concreto.

A NBR 14081-2 (2012) exige que a armadura utilizada para a confecção dos substratos tenha no mínimo 2,5 mm e espaçamento máximo de 5 cm e dimensões de 24 x 49 cm. Devido à dificuldade em encontrar no mercado o modelo de dela eletrossoldada nessas dimensões, foram confeccionadas as armaduras com as mesmas dimensões exigidas pela norma, mas com bitola de aço de 4,2 mm conforme Figura 13.



Figura 13: a) Armaduras confeccionadas; b) Conjunto armadura e forma

A cura do concreto seguiu as condições especificadas pela ABNT NBR 14081-2 (2015). Após 24 horas executou-se a desmoldagem do substrato, que em seguida foi levado para a cura submersa até completar 7 dias. Na sequência, retirou-se o substrato da cura submersa, o qual foi deixado em ambiente climatizado de laboratório, completando assim sua cura por mais 21 dias.

3.2. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

3.2.1. Granulometria

Para determinar a distribuição granulométrica da areia e do resíduo de rocha ornamental, foram realizados os procedimentos previstos na NBR 17054 (ABNT, 2022b), onde após secagem e pesagem dos materiais, foram submetidos ao peneiramento com peneiras de abertura de malha da série normal, correspondente as aberturas de 75 mm, 37,5 mm, 19 mm, 9,5 mm, 9,5mm, 4,75mm, 2,36mm, 1,18mm, 600 μ m, 300 μ m e 150 μ m.

Os resultados obtidos no ensaio de granulometria por peneiramento foram analisados com base nos limites granulométricos estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2022a) para os dois agregados miúdos utilizados nessa pesquisa.

Vale ressaltar que o resíduo proveniente do beneficiamento de rochas ornamentais foi coletado na forma de pasta. As amostras para caracterização foram s foram expostas ao sol durante 72h, após, foram destorroadas e homogeneizadas para serem utilizadas para caracterização.

3.2.2. Composição dos elementos

A composição química do resíduo de rocha ornamental, expresso em óxidos percentuais, foi determinada por meio da técnica de análise química por espectroscopia de raios-X de energia dispersiva (EDX), em um equipamento marca Shimadzu, modelo EDX-700, pertencente ao LECIV/UENF (Figura 14).



Figura 14: Aparelho para análise química EDX-7000 Shimadzu

3.2.3. Dosagem

O traço utilizado para a confecção das argamassas colantes desta pesquisa foi de 1:2 em massa de cimento e agregado, com uma relação água/cimento fixa para todos os teores de substituição de 0,9.

A escolha do traço se deu por ser o usualmente aplicado para produção de argamassas colantes, corroborando também com o trabalho desenvolvido por Azevedo *et al.*, (2017).

Para o desenvolvimento desta pesquisa, foram avaliados os efeitos da substituição parcial da areia pelo resíduo do benéfico de rochas ornamentais. O estudo experimental foi realizado com as proporções de substituição em massa do agregado miúdo nas porcentagens de 0%, 10%, 20%, 30%.

O percentual de aditivos químicos PVA e HEC utilizado na confecção das argamassas foi de 2,5% em relação a massa do cimento de cada aditivo, para cada teor de substituição.

A Tabela 5 abaixo, representa um resumo das composições utilizadas para teor de substituição.

Tabela 5: Referência de traços utilizados

| NOMENCLATURA | TEOR DE SUBSTITUIÇÃO | RELAÇÃO ÁGUA/CIMENTO | TRAÇO EM MASSA (CIMENTO:AREIA:RESÍDUO) |
|---------------------|-----------------------------|-----------------------------|---|
| ACR | 0% | 0,9 | 1:2:0 |
| AC10 | 10% | 0,9 | 1:1,8:0,2 |
| AC20 | 20% | 0,9 | 1:1,6:0,4 |
| AC30 | 30% | 0,9 | 1:1,4:0,6 |

3.3. ENSAIOS NO ESTADO FRESCO

3.3.1. Retenção de água

O ensaio para retenção de água foi realizado de acordo com a NBR 13277 (ABNT, 2005). Para a execução do ensaio foram utilizadas argamassas no estado fresco, confeccionadas conforme a NBR 14081-2 (ABNT, 2015).

A retenção de água é definida como a capacidade que a argamassa tem, no estado fresco de manter sua consistência, mesmo em situações propícias à perda de água. A água é responsável pelo transporte de produtos da hidratação do cimento para os poros e cavidades do substrato, favorecendo a ancoragem mecânica, tendo assim influência direta no estado endurecido da argamassa colante (Groot, 1988; Carasek *et al.*, 2001; Costa, 2006).

Segundo Botelho *et al.*, (2023) a retenção de água é um dos parâmetros fundamentais que devem ser analisados nas argamassas, visto que, a utilização de argamassas com baixo índice de água podem apresentar deficiência na hidratação do

cimento. Como também, influenciar na adesão com o substrato. Para o comportamento contrário, ou seja, no caso de uma argamassa com elevada retenção de água, pode ocorrer também uma deficiência na aderência inicial entre a argamassa e o substrato ao qual o material é aplicado.

Para a execução do ensaio foram necessários uma bomba a vácuo para aplicar a sucção na argamassa, e um funil de Buchner modificado, conforme indicado na Figura 15.



Figura 15: - Aparelho para retenção de água em argamassas da marca Solotest

O procedimento utilizado para a execução do ensaio consistiu em um primeiro momento, acomodar o prato sobre o funil do ensaio, garantindo a estanqueidade entre eles; posteriormente um filtro de papel umedecido foi posicionado no prato do equipamento. Posteriormente a bomba a vácuo foi acionada para que fosse atingido o nível de sucção de 51 mm de mercúrio. Na sequência, a torneira do equipamento que se encontrava fechada foi aberta para a retirada do excesso de água do papel filtro por um período de 90 segundos.

Logo após, foi realizado a pesagem do conjunto funil/papel filtro umedecido (m_v). Na sequência o funil foi preenchido com a argamassa colante até a borda para realizar o adensamento com soquete, no qual, foram aplicados 16 golpes próximos a borda e 21 golpes na parte central da amostra. Após a retirada de excesso do material, a conjunto funil/filtro papel umedecido e a argamassa foram pesados (m_a). Por fim, foi

aberta novamente a torneira de sucção para aplicação da sucção de mercúrio de 51 mm por 15 minutos, e transcorrido esse tempo, o prato foi pesado novamente para obtenção da massa após o procedimento aplicado (m_s).

Após a realização do procedimento experimental, o cálculo da retenção de água foi realizado aplicando a expressão seguinte:

$$R_a = \left[1 - \frac{(m_a - m_s)}{AF * (m_a - m_v)} \right] * 100 \quad \text{Eq. [01]}$$

Sendo AF, o fator água/argamassa fresca determinado por:

$$AF = \frac{m_w}{m + m_w} \quad \text{Eq. [02]}$$

Onde:

m_a = massa do conjunto com argamassa (g);

m_s = massa do conjunto após a sucção (g);

m_v = massa do conjunto vazio (g);

m_w = massa total de água acrescentada à mistura (g);

m = soma das massas dos componentes anidros (g).

3.3.2. Densidade de massa e teor de ar incorporado

O ensaio de densidade de massa foi realizado seguindo o procedimento da NBR 13278 (ABNT, 2005).

O cálculo do teor de ar incorporado foi realizado utilizando os parâmetros de cálculo indicado na norma de referência.

Para a execução do ensaio, foram confeccionadas as argamassas seguindo o procedimento da NBR 14081 (ABNT, 2015). Posteriormente foi realizada o registro da massa recipiente cilíndrico vazio (m_v), na sequência o material foi inserido no recipiente dividido por três camadas uniformes, onde foram aplicados 20 golpes em cada camada. Na sequência, foi realizado o rasamento do material no recipiente para retirar o excesso e novamente feito o registro da massa conjunto recipiente e argamassa (m_c) conforme indicado na Figura 16.



Figura 16: a) Recipiente para densidade de massa b) Conjunto balança de precisão e recipiente da marca Solotest

Os resultados do ensaio de densidade de massa foram obtidos através das expressões, respectivamente detalhadas a seguir:

$$d = 1000 * \frac{m_c - m_v}{v_r} \quad [\text{Eq. 03}]$$

$$d_t = \frac{\sum m_i}{\sum \frac{m_i}{\gamma_i}} \quad [\text{Eq. 04}]$$

Onde,

d - densidade de massa no estado fresco (kg/m^3)

m_c - massa do recipiente cilíndrico contendo argamassa (g)

m_v - massa do recipiente cilíndrico vazio (g)

v_r volume do recipiente cilíndrico (cm^3)

d_t densidade de massa teórico (g/cm^3), obtido através de;

m_i - massa seca de cada componente da argamassa, mais água (g);

γ_i = massa específica de cada componente da argamassa (g/cm^3).

Posteriormente, foi realizado o ensaio de teor de ar incorporado na argamassa. O teor de ar incorporado na argamassa é um fator importante que deve ser avaliado, pois corresponde à quantidade de ar existente em determinado volume de argamassa. É um parâmetro expresso em porcentagem, e considerado de grande importância para os parâmetros de trabalhabilidade e resistência mecânica da argamassa.

A argamassa utilizada para a execução do ensaio, foi preparada conforme o procedimento da NBR 14081 (ABNT, 2015), e o ensaio conforme o procedimento da NBR 13278 (ABNT, 2005). O equipamento utilizado para a execução do ensaio do teor de ar incorporado possui capacidade para 1 L, da marca Solotest, modelo 1.150.001 conforme Figura 17.



Figura 17: Aparelho para análise de teor de ar incorporado da marca Solotest

3.3.3. Deslizamento

Segundo Gado (2022), este método de ensaio destina-se a determinar a resistência do adesivo cimentício modificado com polímero ao deslizamento vertical ou a flacidez das placas cerâmicas instaladas em interiores e exteriores.

O ensaio de deslizamento é preconizado pela NBR 14081-5 (ABNT, 2012), que estabelece o método para determinar o deslizamento de placas cerâmicas quando assentadas com argamassa colante, pelo método da camada fina.

O procedimento utilizado para a realização do ensaio consiste no posicionamento de três placas cerâmicas no substrato padrão na posição vertical. As dimensões das placas são quadradas, com lado de 100 ± 1 mm, apresentam absorção

menor que 0,5% e com massa de 195 ± 5 g. A posição dos cordões formados nas argamassas é de acordo com a NBR 14081-5 (ABNT, 2012), de modo a ficar na vertical durante o ensaio.

Após o posicionamento das três placas câmeras foi realizada a leitura da posição inicial (L_i), e depois de transcorrido o período de 20 minutos do substrato na posicionado na vertical para retornado para posição horizontal e feito a leitura da posição final (L_f) para medição do deslocamento em relação a posição original de referência. A Figura 18 abaixo ilustra a execução do ensaio.



Figura 18: Ensaio de deslizamento

Para obtenção do deslocamento foi utilizado a equação indicada pela NBR 14081-5 para o cálculo do deslizamento (L):

$$L = \frac{\sum(L_f - L_i)}{6} \quad [\text{Eq. 05}]$$

Onde,

L_f - leitura da posição final, expressa em milímetros (mm);

L_i - leitura da posição inicial, expressa em milímetros (mm).

3.4. ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO

3.4.1. Determinação do tempo em aberto

Para a execução do ensaio de tempo em aberto, foram confeccionados 30 corpos de prova para cada teor de substituição. As argamassas foram produzidas

conforme a metodologia da NBR 14081 (ABNT, 2015). O procedimento de execução do ensaio seguiu a orientação indicada na NBR 14081-3 (ABNT, 2012). Ao qual, a argamassa foi estendida sob o substrato com o apoio de uma desempenadeira denteada, transcorrido o período de 15 minutos, as placas cerâmicas foram assentadas sobre a argamassa colante e submetidas à cura normal, como descrito na NBR 14081-3 (ABNT, 2012). Após 28 dias de cura da argamassa, foram realizados os ensaios para obtenção da tensão de ruptura.

O cálculo da tensão de ruptura (σ_t) de cada placa cerâmica foi realizado utilizando a seguinte equação, preconizada na norma de referência. As etapas de execução do ensaio são mostradas na Figura 19.

$$\sigma_t = \frac{T}{A} \quad [\text{Eq. 07}]$$

Onde,

σ_t - tensão de ruptura (MPa);

T - carga de ruptura (N);

A - área da placa cerâmica (mm²)

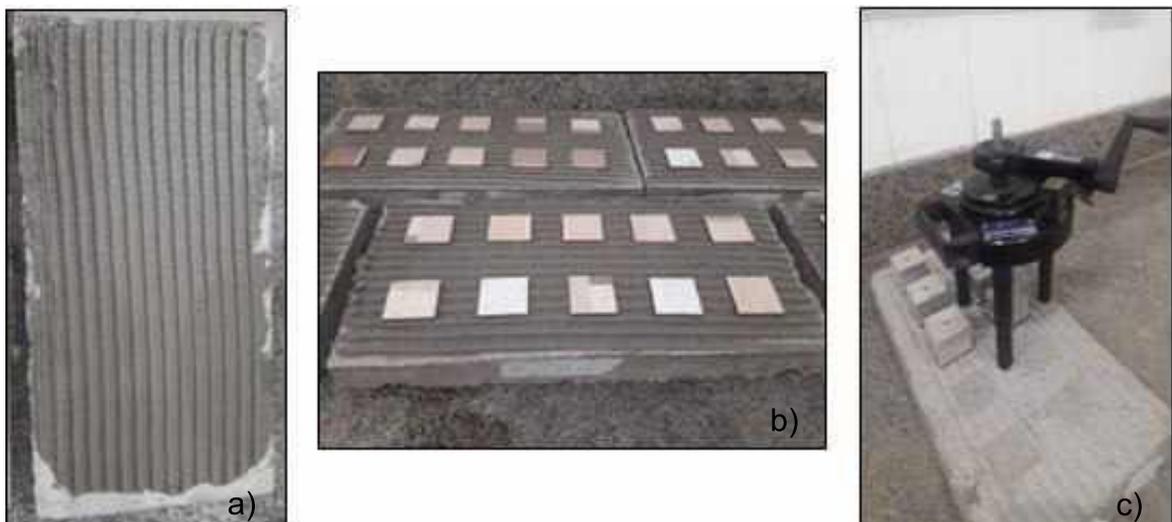


Figura 19: (a) Argamassa estendida sobre o substrato padrão; b) Placas cerâmicas posicionadas sobre o substrato após 15 minutos e c) Execução do ensaio de resistência à tração

3.4.2. Determinação de resistência à aderência à tração

A resistência de aderência de um sistema de revestimento cerâmico é uma das principais propriedades desse tipo de acabamento. Vale ressaltar que de acordo com

a NBR 14081- 4 (ABNT, 2012) as argamassas devem ter no mínimo resistência de aderência à tração de 0,5 MPa aos 28 dias.

Para a execução do ensaio de resistência à aderência à tração, as argamassas foram confeccionadas seguindo o procedimento da NBR 14081 (ABNT, 2015). Após o preparo da argamassa, o material foi estendido sob o substrato com o apoio de uma desempenadeira denteada conforme preconizado na NBR 14081-4 (ABNT, 2012).

Logo após a moldagem, as placas cerâmicas foram assentadas sobre a argamassa colante, identificadas e submetidas à cura normal.

Conforme prescrito na NBR 14081-4 (ABNT, 2012) é necessário submeter os corpos de corpo a três diferentes tipos de cura, conforme descrito abaixo com maior nível de detalhes.

Na cura normal o conjunto permaneceu durante 28 dias em condições ambientais do laboratório (temperatura de $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa do ar de $60 \pm 4\%$, sem presença de vento) conforme indicado na Figura 20.



Figura 20: Conjunto submetido a cura normal em ambiente de laboratório

Na cura com imersão em água, os corpos de provas permaneceram durante 7 dias sob condições de laboratório e, em seguida, serão imersos em água a $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$, durante 21 dias conforme indicado no Figura 21.



Figura 21: Conjunto submetido a cura por imersão

Na cura em estufa os corpos de prova permanecerão durante 14 dias, sob condições ambientais de laboratório e, em seguida, serão colocados na estufa com temperatura de $70 \pm 2^\circ\text{C}$ por mais 14 dias para o término da cura conforme indicado na Figura 22.



Figura 22: Conjunto submetido a cura em estufa a temperatura de 70°

Faz parte do procedimento de execução desse ensaio, a determinação do tipo de ruptura (Figura 23):

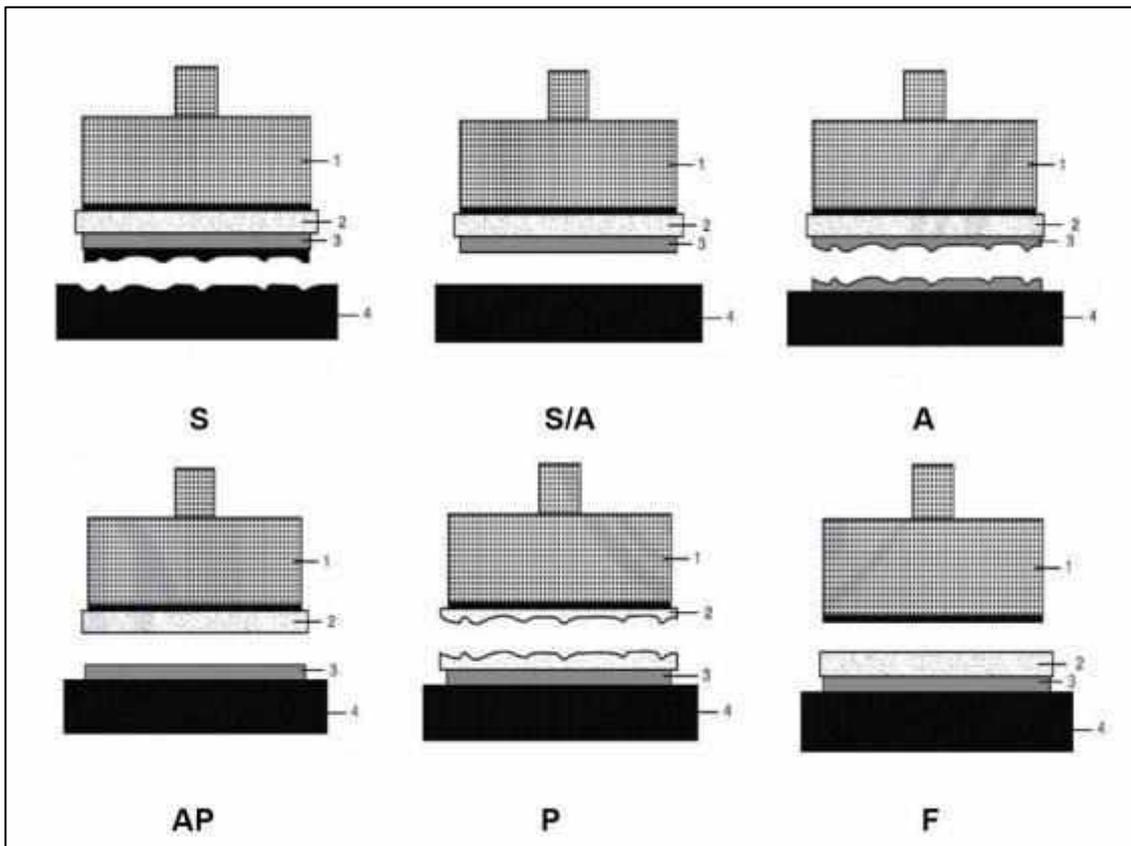


Figura 23: Detalhamento típico de Ruptura. Fonte: NBR 14081 (2012)

S – ruptura no substrato;

S/A – ruptura na interface argamassa e substrato;

A – ruptura na camada de argamassa colante;

A/P – ruptura na interface argamassa e placa cerâmica.

Por fim, o programa experimental foi composto pela confecção de 4 traços, sendo 1 de referência, 3 contendo a substituição parcial da areia pelo resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais nas porcentagens de 10%, 20% e 30%.

3.5. ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os resultados obtidos com o programa experimental foram tratados conforme indicado pelas normas que circunscrevem a execução dos ensaios, e submetidos a testes estatísticos com o intuito de verificar a variância entre os resultados obtidos.

Primeiramente os resultados dos ensaios foram submetidos à análise de variância (ANOVA) através do delineamento inteiramente casualizado (DIC). Este

delineamento considera os princípios da repetição e da casualização, sendo amplamente utilizado em tratamentos homogêneos, muito comuns nas engenharias.

A ANOVA auxilia a descobrir se a diferença nos valores médios é significativa através do parâmetro F. Este parâmetro é comparado com um F tabelado que modifica de acordo com o número de amostras e o nível de significância, neste caso, 5% ($p < 0,05$). Se o F calculado for menor que o F tabelado, conclui-se que os tratamentos têm efeito diferenciado ao nível de significância em que o teste foi realizado.

Os resultados da ANOVA indicam que a distribuição de pelo menos um grupo é distinta das demais, porém não evidencia entre quais grupos a diferença é significativa, sendo assim necessário o uso do teste de Tukey. Este teste faz comparações múltiplas através da diferença mínima significativa (DMS) ao comparar os percentis dos grupos, gerando um valor P. Se o valor de P calculado for menor que o nível de significância, aqui também 5% ($p < 0,05$), a série é significativa, portanto, tem comportamento diferenciado da sua comparação.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos no programa experimental. Os resultados estão ordenados e agrupados de forma a facilitar a compreensão. Inicialmente são apresentados os resultados obtidos com a caracterização da areia e do resíduo de rochas ornamentais,

Posteriormente são analisados os resultados do ensaio no estado fresco, densidade de massa, teor de ar incorporado, retenção de água e deslizamento. Após são analisados os ensaios no estado endurecido, tempo em aberto e aderência à tração após 28 dias. Os resultados relativos aos ensaios foram submetidos à análise estatística ANOVA.

4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

4.1.1. Caracterização da areia

A areia foi caracterizada de acordo com a NBR 17054 (ABNT, 2022b) e a curva granulométrica do material está representada na Figura 24.

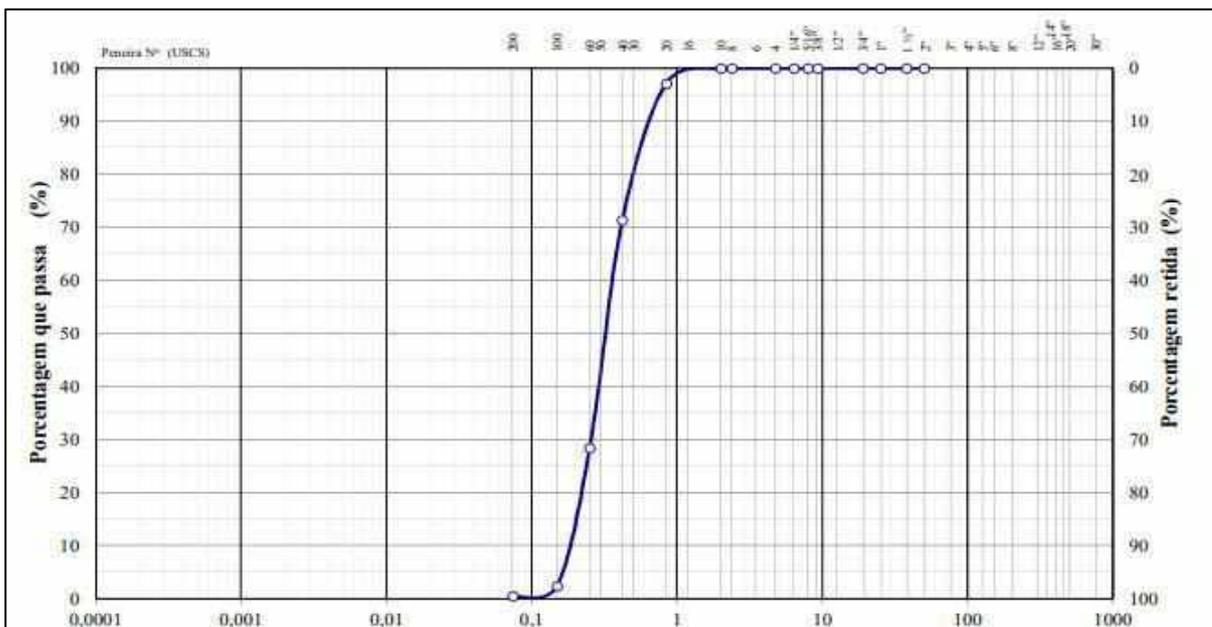


Figura 24: Curva granulométrica da areia

É possível observar que aproximadamente 67% da fração da areia foi classificada como areia média, 15% areia fina e 18% como areia grossa. Essa característica da areia pode estar relacionada a diversos fatores, principalmente o período e o local onde foi extraída.

4.1.2. Caracterização do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais

A distribuição granulométrica das partículas do resíduo foi determinada de acordo com a norma técnica NBR 7211 (ABNT, 2022a). A curva granulométrica obtida após o ensaio é mostrada na Figura 25.

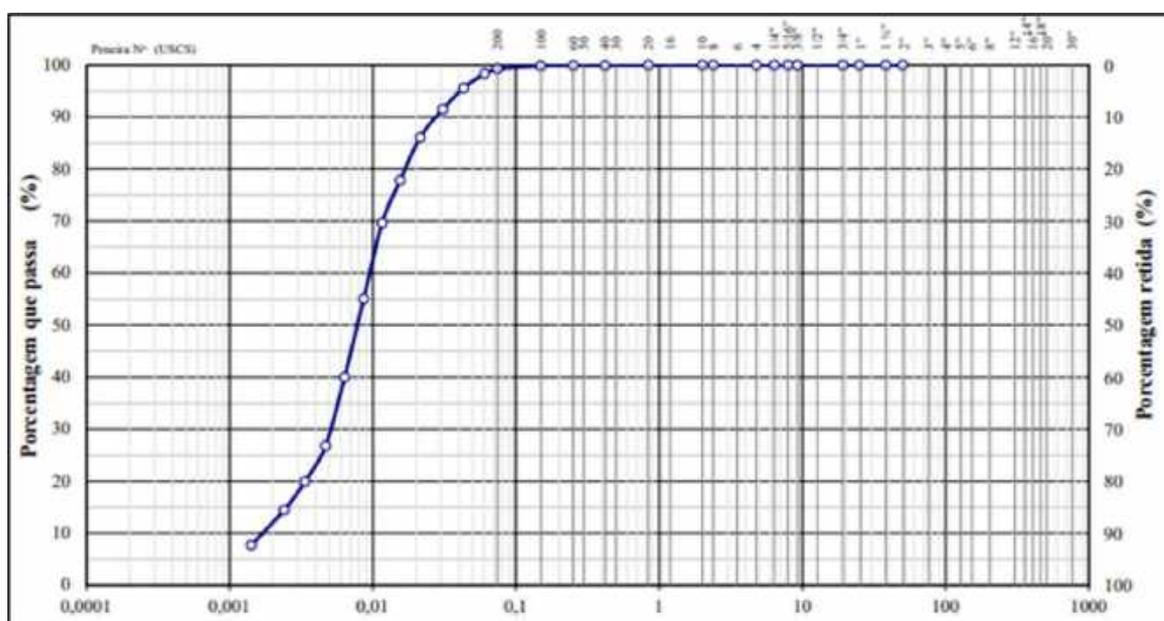


Figura 25: Curva granulométrica do resíduo proveniente do beneficiamento de rochas ornamentais

É possível observar que 87% do material ensaiado encontra-se na fração silte, 2% na fração e areia fina e 10% na fração de argila.

Esses resultados corroboram com os encontrados por outros autores que indicaram que 86% dos resíduos de mármore estão na faixa de tamanho de silte (tamanho de partícula: 0,002–0,075 mm) e 14% estão no escopo da faixa de tamanho de areia fina (tamanho da partícula: 0,075–0,42 mm), com base no fato de que o material de lama de mármore e granito pode ser classificado como um material semelhante a argila de silte (Gado, 2022).

O resíduo proveniente do beneficiamento de rochas ornamentais, foi submetido também, a análise da composição química expresso em óxidos percentuais.

Os resultados obtidos com a execução do ensaio estão indicados na Tabela 6.

Tabela 6: Elementos na forma de óxidos presentes no resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais

| Composto | Composição (% em massa) |
|--------------------------------|------------------------------------|
| SiO ₂ | 84,45 |
| Al ₂ O ₃ | 6,09 |
| CaO | 4,32 |
| Fe ₂ O ₃ | 1,75 |
| SO ₃ | 1,49 |
| K ₂ O | 1,29 |
| TiO ₂ | 0,54 |
| V ₂ O ₅ | 0,03 |
| SrO | 0,01 |
| ZrO ₂ | 0,01 |

É possível observar um alto teor de dióxido de silício de 84,45%. A origem da sílica pode estar relacionada aos feldspatos, minerais micáceos (biotita e mica muscovita) e sílica livre presentes em rochas silicáticas.

4.2. ENSAIOS REALIZADOS NO ESTADO FRESCO

4.2.1. Densidade de massa e teor de ar incorporado

Os ensaios para determinação da densidade de massa e teor de ar incorporado das argamassas colantes foram realizados seguindo os procedimentos indicados na NBR 13278 (ABNT, 2005).

Os resultados obtidos no ensaio de teor de ar incorporado são apresentados na Figura 26.

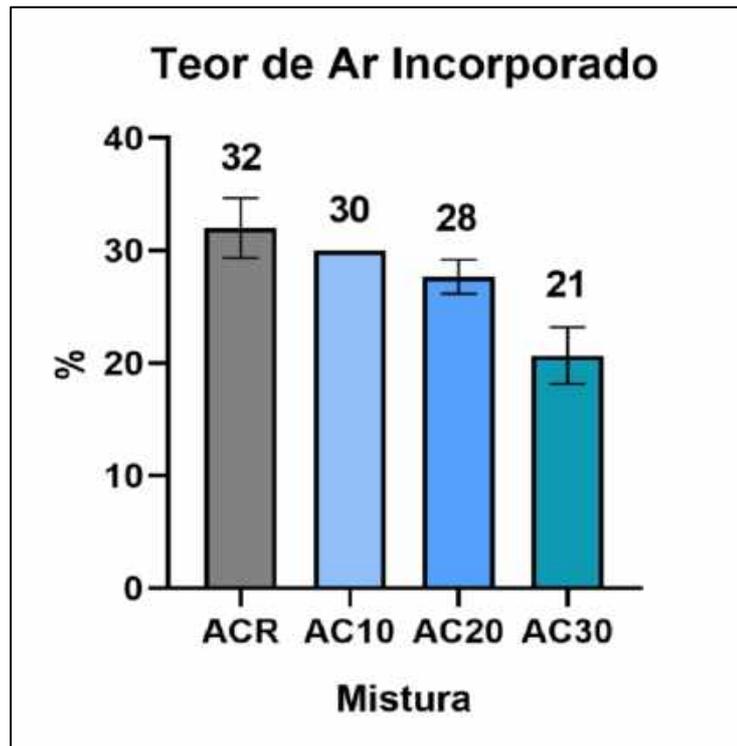


Figura 26: Resultados do ensaio de teor de ar incorporado

É possível observar que ocorreu uma redução gradual no percentual de teor de ar incorporado das misturas após o incremento de resíduo de rochas ornamentais. A ACR apresenta um teor de ar incorporado de 32% em contrapartida as AC20 e AC30 apresentam um teor de ar incorporado de 28% e 21% respectivamente. Esse comportamento das misturas pode ser explicado pelo incremento de percentual de finos as misturas. Fato que tende a corroborar com o comportamento já esperados para essas argamassas, e vale destacar que a AC30 foi a que representou o menor teor de ar incorporado entre as misturas ensaiadas.

São apresentados na Figura 27 os resultados obtidos no ensaio de densidade de massa.

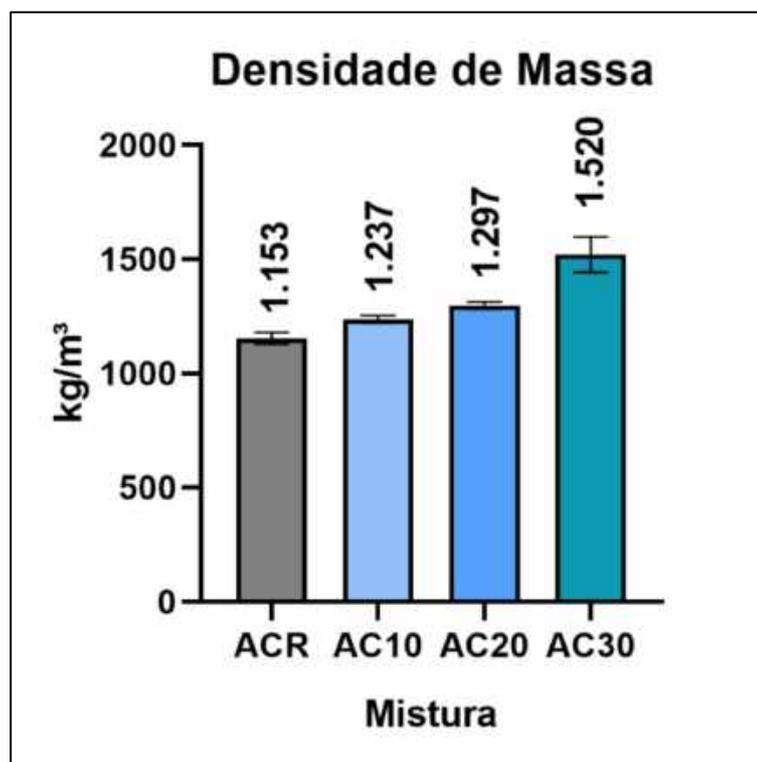


Figura 27: Resultados do ensaio de densidade de massa

Os resultados obtidos no ensaio de densidade de massa mostram que ocorreu um aumento gradual no valor da densidade de massa entre a ACR e as AC10, AC20 e AC30. Foi possível observar que AC30 apresentou a maior densidade de massa, com 1.520 kg/m^3 em contrapartida, foi o traço que apresentou o menor índice de teor de ar incorporado.

Após a análise dos resultados obtidos, foi possível observar que existe uma correlação entre os resultados obtidos para ambos os ensaios das argamassas colantes estudadas. Os resultados das propriedades analisadas se devem ao fato de que com o incremento de material de granulometria mais fina, os espaços vazios antes existentes são preenchidos por esse material e conseqüente ocorre um aumento na densidade de massa das misturas.

Os resultados obtidos nesta pesquisa corroboram com os encontrados por outros pesquisadores, como Kherraf *et al.*, (2022) que avaliou o desempenho das argamassas à base de areia de resíduos de mármore, ladrilhos e blocos de concreto. Os autores produziram argamassas com areia de resíduos de mármore e identificaram que ocorreu uma redução nos valores do teor de ar incorporado, em relação à argamassa de referência. As reduções encontradas pelos autores foram na ordem de 5 a 29% entre as proporções de substituição da areia natural pela areia de resíduo de

mármore de 5 e 20%, respectivamente. Ainda segundo os autores, esse fato pode ser explicado pela capacidade plastificante do mármore, que garante a adesão entre os elementos, reduzindo assim, o teor de ar incorporado presente na argamassa (Kherraf *et al.*, 2022).

O teor de ar incorporado das argamassas é uma propriedade importante que está inteiramente ligada as areias residuais, as taxas de substituição e da capacidade de ligação em relação à quantidade de finos presentes (Kherraf *et al.*, 2022).

De fato, o comportamento apresentado nos resultados desse experimento indica que a adição de material de granulometria fina, é capaz de preencher os espaços vazios presentes nas argamassas. Correlacionado com os resultados do ensaio de densidade de massa, onde as argamassas obtiveram um ganho de densidade de massa com o incremento do percentual de resíduo incorporado a mistura ensaiada. Sendo assim, pode-se concluir que a incorporação proporcionou um ganho nas propriedades do material, principalmente nas propriedades do material no estado endurecido.

Os resultados obtidos nos ensaios de densidade de massa e teor de ar incorporado foram submetidos a análise de variância (ANOVA) e ao teste de Tukey.

Salienta-se que foram confeccionados 3 CP's para cada teor de substituição em massa da areia pelo resíduo, portanto, foram realizadas 3 repetições de execução do ensaio.

Os resultados da análise estatística do ensaio de densidade de massa são apresentados nas Tabelas 7 e 8 a seguir.

Tabela 7: ANOVA do efeito do percentual de resíduo sobre a densidade de massa

| FV | GL | SQ | QM | F Tabelado | F calculado | Teste |
|-------------|-----------|-----------|-----------|-------------------|--------------------|--------------|
| Tratamentos | 3 | 221767 | 73922 | F (3,8) = 41,07 | <0,0001 | Significante |
| Resíduo | 8 | 14400 | 1800 | - | - | - |
| Total | 11 | 236167 | - | - | - | - |

Observa-se que a série do ensaio de densidade de massa é significativa, logo induziu-se ao teste de Turkey que é apresentado na Tabela 7 abaixo.

Tabela 8: Teste de Turkey do efeito do percentual de resíduo sobre a densidade de massa

| Comparações | DMS | I.C. – 95% | Valor P | Significância |
|--------------------|------------|-------------------|----------------|----------------------|
| ACR vs. AC10 | -83,33 | -194,3 ; 27,60 | 0,1532 | Não |
| ACR vs. AC20 | -143,3 | -254,3 ; -32,40 | 0,0139 | Sim |
| ACR vs. AC30 | -366,7 | -477,6 ; -255,7 | <0,0001 | Sim |
| AC10 vs. AC20 | -60,00 | -170,9 ; 50,93 | 0,3688 | Não |
| AC10 vs. AC30 | -283,3 | -394,3 ; -172,4 | 0,0002 | Sim |
| AC20 vs. AC30 | -223,3 | -334,3 ; -112,4 | 0,0009 | Sim |

Com base no teste de Turkey, existem evidências estatísticas que afirmam que a substituição da areia pelo resíduo de rocha ornamental apresenta apresentam interferências significativas na propriedade de densidade de massa das argamassas ensaiadas. É possível observar que não existem interferências significativas entre as ACR e a AC10, bem como entre a AC10 e a AC20. Logo, podemos concluir que a AC30 é a argamassa que apresenta maior interferência entre as argamassas ensaiadas, tendenciando a ser uma referência de grande importância para o estudo.

A seguir, são apresentados a análise estatística do ensaio de teor de ar incorporado nas Tabelas 9 e 10.

Tabela 9: ANOVA do efeito do percentual de resíduo no teor de ar incorporado

| FV | GL | SQ | QM | F Tabelado | F calculado | Teste |
|-------------|-----------|-----------|-----------|-------------------|--------------------|--------------|
| Tratamentos | 3 | 219,6 | 73,19 | F (3,8) = 18,69 | 0,0006 | Significante |
| Resíduo | 8 | 31,33 | 3,917 | - | - | - |
| Total | 11 | 250,9 | - | - | - | - |

O resultado de ANOVA indica a significância entre as variações dos resultados, com isso, foi realizado o teste de Turkey que está representado na Tabela 10.

Tabela 10: Teste de Turkey do efeito do percentual de resíduo sobre o teor de ar incorporado

| Comparações | DMS | I.C. – 95% | Valor P | Significância |
|--------------------|------------|-------------------|----------------|----------------------|
| ACR vs. AC10 | 2,000 | -3,175 ; 7,175 | 0,6225 | Não |
| ACR vs. AC20 | 4,333 | -0,8413 ; 9,508 | 0,1042 | Não |
| ACR vs. AC30 | 11,33 | 6,159 ; 16,51 | 0,0005 | Sim |
| AC10 vs. AC20 | 2,333 | -2,841 ; 7,508 | 0,5094 | Não |
| AC10 vs. AC30 | 9,333 | 4,159 ; 14,51 | 0,0019 | Sim |
| AC20 vs. AC30 | 7,000 | 1,825 ; 12,17 | 0,0107 | Sim |

É possível observar após a aplicação do teste de Turkey que as argamassas AC10 e AC20 não possuem variação significativa quanto à propriedade de teor de ar incorporado quando comparadas com ACR e entre elas. Os resultados apontam que existe significância nas comparações da argamassa com AC30, tanto com a argamassa ACR quanto AC10 e a AC20.

4.2.2. Retenção de água

O ensaio de retenção de água foi realizado seguindo a metodologia presente na NBR 13277 (2016). Os resultados foram calculados através das expressões (01) e (02) e os valores obtidos após a execução do ensaio estão disponíveis na Figura 28.

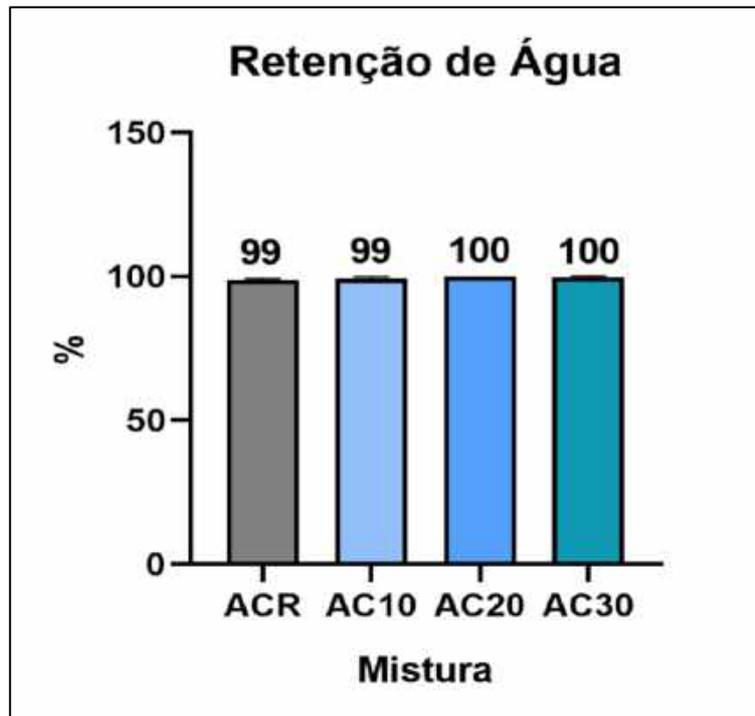


Figura 28: Resultado do ensaio de retenção de água

Os resultados obtidos indicam que não ocorreram mudanças significativas nessa propriedade. Foi possível observar que os menores valores de retenção de água foram obtidos na ACR e na AC10, no entanto, os valores de retenção de água para as AC20 e AC30 se mantiveram constantes, sofrendo apenas um leve aumento quando comparado a ACR e AC10. Sendo assim, podemos identificar que as argamassas AC20 e AC30 são as que reterão maior quantidade de água.

Tal comportamento pode ser explicado, pela incorporação de finos na argamassa, consequentemente com maior área superficial, fazendo com que a mistura retenha maior quantidade de água.

Botelho *et al.*, (2023) ressalta em sua pesquisa que partículas menores possuem uma área superficial específica maior. Isso resulta em um sistema de poros mais fino, resultando em maior absorção e menor permeabilidade.

Buyuksagis *et al.*, (2017) em sua pesquisa avaliou o reaproveitamento do resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais para produção de argamassas colantes, substituindo a dolomita nas porcentagens de 0%, 20%, 30%, 40%, 60% e 100% pelo resíduo de rocha. Os pesquisadores observaram que um aumento na porcentagem da retenção de água nas porcentagens de 20% e 40% quando comparada a argamassa de referência.

De fato, os resultados obtidos nesse ensaio corroboram com o comportamento esperado para mistura que contenham porcentagens significativas de resíduos finos, e obtêm resultados similares aos obtidos por Buyuksagis *et al.*, (2017)

Os resultados do ensaio de retenção de água foram submetidos a análise de variância (ANOVA) e estão disponíveis na Tabela 11.

Tabela 11: ANOVA efeito do percentual de resíduo na retenção de água

| FV | GL | SQ | QM | F Tabelado | F calculado | Teste |
|--------------------|-----------|-----------|-----------|-------------------|--------------------|----------------|
| Tratamentos | 3 | 2,917 | 0,9722 | F (3,8) = 3,889 | 0,0553 | Insignificante |
| Resíduo | 8 | 2,000 | 0,2500 | - | - | - |
| Total | 11 | 4,917 | - | - | - | - |

O resultado da análise estatística ANOVA indicou que não existe significância entre as variações que ocorreram entre os diferentes teores de substituição AC10, AC20 e AC30 quando comparados ao ACR. Sendo assim, não foi necessário submeter os resultados ao teste de Turkey.

4.2.3. Deslizamento

O ensaio de deslizamento foi realizado seguindo os procedimentos indicados na NBR 14081-5 (ABNT, 2012).

Os resultados obtidos com a execução do ensaio estão indicados na Figura 29.

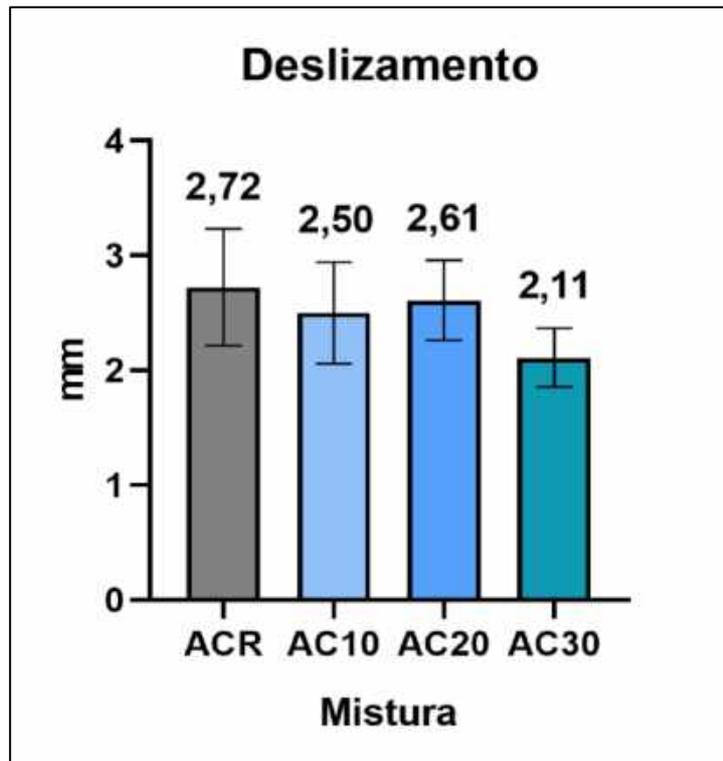


Figura 29: Resultados do ensaio de deslizamento

Os resultados obtidos com o ensaio de deslizamento indicam que nenhuma das argamassas ensaiadas conseguiu alcançar o nível exigido pela NBR 14081-4 (2012), que estabelece que o deslizamento deve ser inferior ou igual a 2 mm. No entanto, a argamassa AC30 foi a que apresentou o menor deslizamento quando comparada às outras argamassas, com um deslocamento médio de 2,11 mm (77,86% do valor obtido para a argamassa de referência), valor considerado próximo aos parâmetros exigidos pela norma. Um ponto importante observado foi que a ACR foi a que apresentou o maior deslizamento, com 2,71 mm e que após o incremento de resíduos as misturas, ocorreu uma redução considerável no valor desse deslizamento.

As argamassas colantes possuem agentes denominados polímeros, aditivos químicos que possuem a função de melhorar sua plasticidade e coesão, e assim, contribuir para a redução do deslizamento. Para este estudo, foi utilizado o HEC (hidróxietil celulose), na porcentagem de 2,5% em relação a massa do cimento. No entanto, os resultados comprovaram que o incremento desse aditivo contribuiu de forma significativa nas outras propriedades das argamassas ensaiadas, mas não conseguiu contribuir de forma completa para a redução do deslizamento das argamassas estudadas.

Os resultados do ensaio comprovaram uma perspectiva do autor quando ao deslizamento das placas, uma vez que, com o incremento de resíduo de rochas ornamentais era se esperado que ocorresse a redução do deslizamento por estar trabalhando com um material mais denso, em virtude do preenchimento dos vazios pelo resíduo, estando tal comportamento alinhado com os obtidos no ensaio de densidade de massa e teor de ar incorporado.

Gado (2022) estudou a viabilidade da utilização de resíduo de lamas de mármore e granitos para a produção de argamassas colantes nas porcentagens de substituição de 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%. Os resultados obtidos pelo autor indicam que com o incremento de pó de mármore e granito nas misturas, ocorreu um aumento na resistência ao deslizamento das argamassas estudadas entre as porcentagens de 10% e 15%. Ainda segundo o autor, a redução na resistência ao deslizamento ocorreu devido ao aumento da quantidade de água misturada, o que afeta negativamente a característica de flacidez da formulação preparada na parede vertical.

Os resultados obtidos no ensaio, foram submetidos a análise estatísticas e seus respectivos resultados estão indicados nas Tabelas 12.

Tabela 12: ANOVA efeito do percentual de resíduo no deslizamento

| FV | GL | SQ | QM | F Tabelado | F calculado | Teste |
|-------------|-----------|-----------|-----------|-------------------|--------------------|----------------|
| Tratamentos | 3 | 0,6398 | 0,2133 | F (3,8) = 1,335 | 0,3295 | Insignificante |
| Resíduo | 8 | 1,278 | 0,1597 | - | - | - |
| Total | 11 | 1,918 | - | - | - | - |

O resultado da análise estatística ANOVA indicou que não existe significância entre as variações que ocorreram entre os diferentes teores de substituição AC10, AC20 e AC30 quando comparados ao ACR. Sendo assim, não foi necessário submeter os resultados ao teste de Turkey.

4.3. ENSAIOS REALIZADOS NO ESTADO ENDURECIDO

4.3.1. Tempo em aberto

O ensaio para a determinação do tempo em aberto foi realizado seguindo os procedimentos indicados na NBR 14081-3 (ABNT, 2012).

Os resultados do ensaio de tempo em aberto das argamassas colantes estudadas são apresentados na Figura 30.

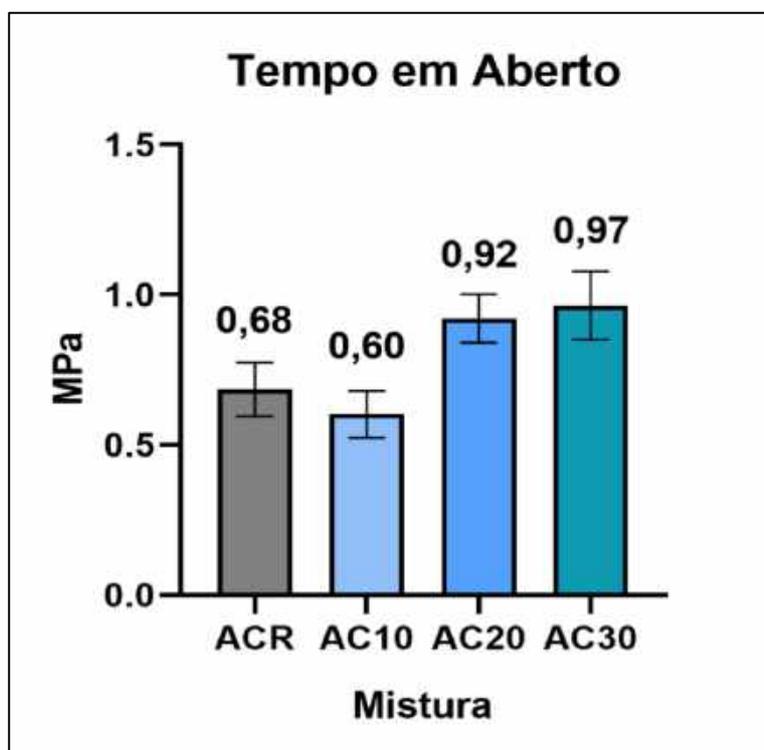


Figura 30: Resultados do ensaio de tempo em aberto

A propriedade do tempo em aberto está relacionada ao período de tempo que a argamassa é estendida sob o substrato e permanece trabalhável para fixação dos revestimentos.

Portanto, o requisito tempo em aberto baseado na norma para todos os tipos de argamassas AC I, AC II, AC III deve atender aos critérios fundamentais exigidos pela norma de 0,5 MPa, após pelo menos 15 minutos em condições padrão de laboratório. Além disso, o produto com horário estendido é denominado pela letra “E”, pois possui um tempo em aberto estendido de 10 minutos. Vale ressaltar que os

resultados obtidos neste ensaio, consideram o tempo em aberto de 15 minutos, conforme indicado na norma NBR 14081 e evidenciado na Tabela 1 deste documento.

Os resultados obtidos com a execução do ensaio, indicam que as argamassas AC10, AC20 e AC30 tiveram um aumento significativo de resistência a aderência à tração quando comparada a ACR. Tal comportamento evidencia que a incorporação do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais possui influência sobre as propriedades da argamassa no estado endurecido. Embora os resultados entre a ACR e AC10 não apresentem um ganho significativo de resistência, esse aumento é observado entre as AC20 e AC30. Fato que corrobora com os resultados obtidos nos ensaios no estado fresco que apontam a AC30 interferindo com maior significância nas propriedades analisadas.

Segundo Gado (2022) os valores de tempo em aberto das argamassas colantes possuem relação direta com o tipo de éter de celulose utilizado na mistura e pela dosagem em massa realizada na mistura. Sua principal característica na confecção de argamassas colantes é a retenção de água, e assim evitar a evaporação de água durante o processo de aplicação das argamassas sob diferentes condições de ambiente. Portanto, existe uma relação direta entre a dosagem desse material com o tempo em aberto do material confeccionado.

Ainda segundo Gado (2022) que estudou a viabilidade da utilização de resíduo de lamas de mármore e granitos para a produção de argamassas colantes nas porcentagens de substituição de 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%. Ao avaliar as propriedades de tempo em aberto, optou por realizar a análise nos períodos de 5, 10, 20 e 30 minutos após a aplicação das argamassas. O autor observou que a resistência à tração foi afetada pela incorporação do resíduo. Os resultados indicaram que até 10% de substituição sob os períodos, a argamassa obteve a resistência exigida pela norma, mas para os demais teores de substituição as argamassas não atingiram a resistência exigida. Ainda segundo o autor, esse comportamento se deve principalmente ao incremento na taxa de hidratação do cimento devido ao aumento da disponibilidade de sítios de nucleação afetado pela carga de lodo incorporada com alta área superficial e características de aceleração de pega.

No entanto, os resultados obtidos nesta pesquisa apontam uma discordância entre os resultados obtidos por Gado (2022), uma vez que obteve um ganho nas porcentagens de substituição com o incremento de finos as misturas, não tendo esse comportamento apresentado até a argamassa com 10% de substituição. Por sua vez,

ao analisar os resultados obtidos por nesta pesquisa corroboram com os obtidos Gokhan *et al.*, (2019).

Os autores estudaram a utilização do pó de pedreiras na produção de argamassas colantes à base de cinzas volantes, com a utilização do pó de pedra na fração de 100% de pó misturado com areia siliciosa na proporção de 1/3. Os resultados obtidos nos ensaios de resistência à tração indicaram que após incremento do pó de pedra ocorreu um aumento gradual com a substituição. Os autores concluíram que a incorporação do pó de pedra em granulometria fina foi responsável não só por melhorar a reologia da argamassa no estado fresco, mas também, contribuiu para o ganho de resistência à medida em que foi aumentada o percentual de incorporação do material.

De forma geral, os resultados obtidos no ensaio de resistência a aderência à tração para obtenção dos parâmetros de tempo em aberto, apresentaram resultados satisfatórios que indicam que a incorporação do resíduo de rochas ornamentais em substituição a areia não prejudica o tempo em aberto da argamassa.

Os resultados do ensaio conforme Anexo I foram submetidos a análise estatística e estão representados nas Tabelas 13 e 14.

Tabela 13: ANOVA do efeito do percentual de resíduo tempo em aberto

| FV | GL | SQ | QM | F Tabelado | F calculado | Teste |
|-------------|-----------|-----------|-----------|-------------------|--------------------|--------------|
| Tratamentos | 3 | 1,340 | 0,4468 | F (3,53) = 51,94 | <0,0001 | Significante |
| Resíduo | 53 | 0,4559 | 0,008601 | - | - | - |
| Total | 56 | 1,796 | - | - | - | - |

O resultado da análise de variância ANOVA indicou que existe uma variância entre os resultados obtidos, logo, foi aplicado o teste de Turkey que é apresentado na Tabela 14.

Tabela 14: Teste de Turkey do efeito do percentual de resíduo sobre tempo em aberto

| Comparações | DMS | I.C. – 95% | Valor P | Significância |
|--------------------|------------|--------------------|----------------|----------------------|
| ACR vs. AC10 | 0,08264 | -0,001883 ; 0,1672 | 0,0575 | Não |
| ACR vs. AC20 | -0,2374 | -0,3419 ; -0,1328 | <0,0001 | Sim |
| ACR vs. AC30 | -0,2808 | -0,3668 ; -0,1948 | <0,0001 | Sim |
| AC10 vs. AC20 | -0,3200 | -0,4265 ; -0,2135 | <0,0001 | Sim |
| AC10 vs. AC30 | -0,3634 | -0,4518 ; -0,2750 | <0,0001 | Sim |
| AC20 vs. AC30 | -0,04342 | -0,1511 ; 0,06428 | 0,7095 | Não |

Os resultados obtidos após a aplicação do teste de Turkey apontam que, a argamassa AC10 não possui variação com significância, quando comparada a ACR. No entanto, as argamassas AC20 e AC30 possuem variação nos resultados com significância estatística em relação a ACR. Com isso, podemos concluir que a mistura de até 10% de substituição não representa mudança significativa na propriedade de tempo em aberto das argamassas, e que as variações de 20% para 30% não possuem interferência significativa sobre essa propriedade da argamassa. Contudo, é observado que a argamassa AC30 tende a ser o teor de substituição que representa grande ganho nessa propriedade dentre as argamassas estudadas nesta pesquisa.

4.3.2. Aderência à tração

Segundo Li *et al.*, (2022) a resistência a aderência à tração das argamassas colantes são demasiadamente afetadas pelo tipo de cura ao qual foram submetidas, os componentes e os substratos ao qual foram aplicadas.

Para a execução do ensaio de resistência a aderência à tração, foram confeccionados os corpos que foram submetidos a cura normal, cura em estufa e cura por imersão. O ensaio foi realizado seguindo os procedimentos indicados na NBR 14081-4 (2012) e apresentados nos Apêndices I, II e III. Para cada tipo de cura e teor de substituição foram confeccionados 3 corpos de prova.

A seguir são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de aderência à tração submetido a cura normal, cura em estufa e cura por imersão, nas Figuras 31, 32 e 33, respectivamente.

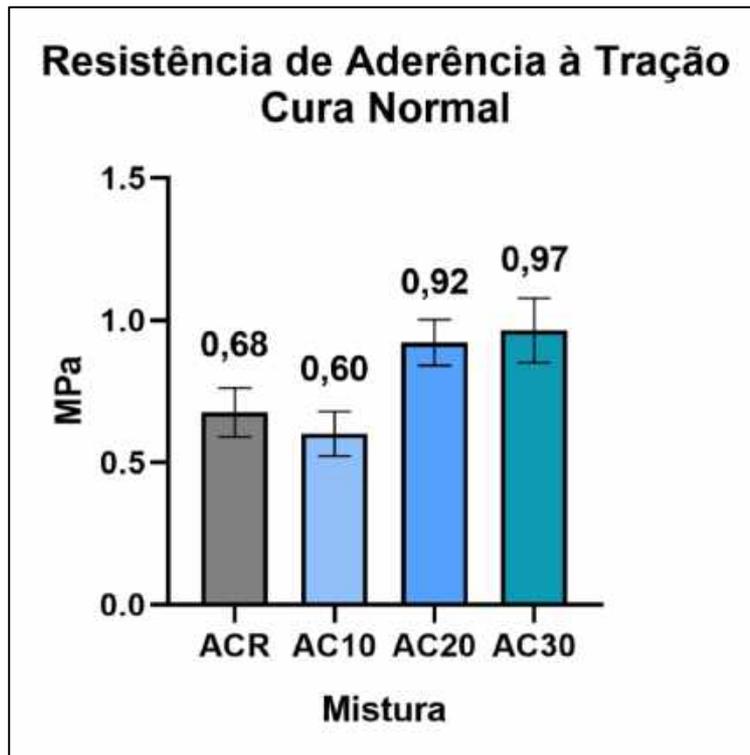


Figura 31: Resultado do ensaio de resistência a aderência à tração - Cura normal

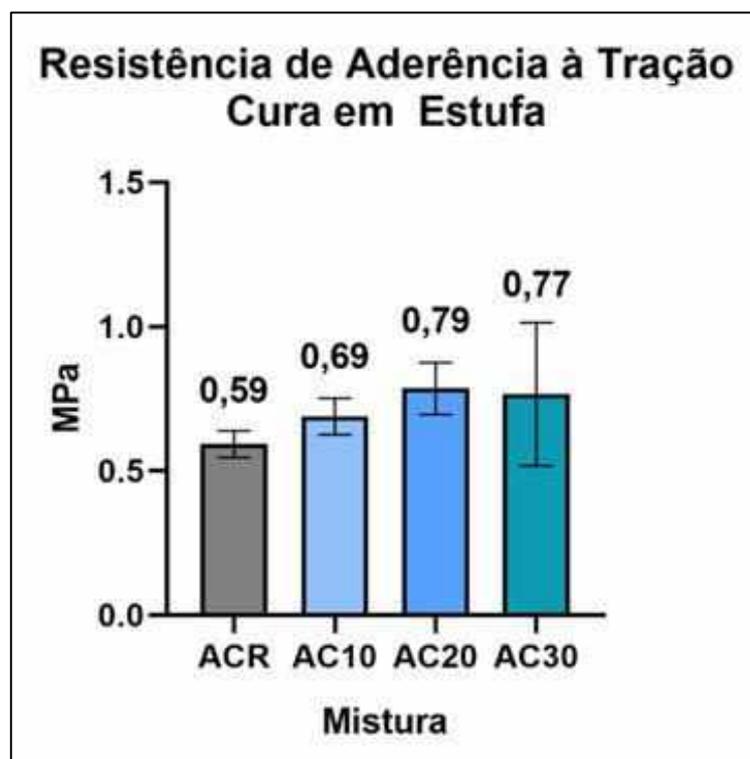


Figura 32: Resultados do ensaio de resistência a aderência à tração - Cura em estufa

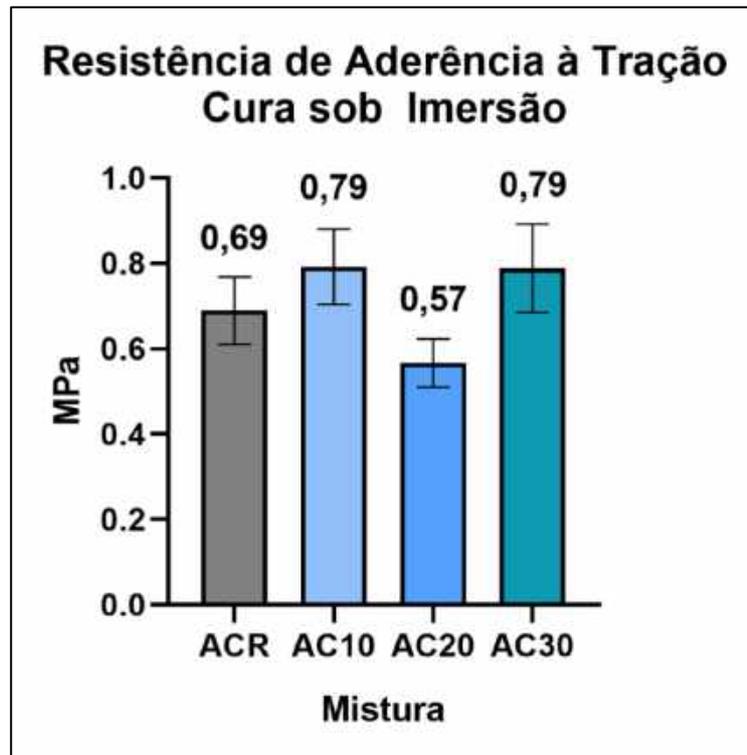


Figura 33: Resultados do ensaio de resistência a aderência à tração - Cura por imersão

Os resultados obtidos após a execução dos ensaios, indicam que para todos os teores de substituição, sobre diferentes tipos de cura atingiram a resistência a aderência à tração mínima exigida pela norma brasileira de 0,5 MPa para argamassas colantes.

Vale ressaltar que as argamassas AC20 e AC30 submetidas a cura normal foram as que apresentaram os maiores valores de resistência a aderência à tração, sendo respectivamente os valores de 0,92 e 0,97 MPa. Conforme já era esperado, as argamassas que obtiveram os menores valores de resistência a aderência à tração foram as argamassas submetidas a cura em estufa na temperatura de 70° durante 14 dias. Os resultados indicam mesmo sobre tais condições, o resíduo contribuiu para o ganho de resistência, sendo observado que a argamassa AC30 foi a que apresentou a maior resistência de 0,77 MPa em contrapartida a ACR apresentou 0,59 MPa.

Para o ensaio de resistência a aderência à tração submetido a cura em estufa, os resultados apontam para no ganho de resistências para as argamassas AC10 e AC30 com 0,79 MPa para ambas as porcentagens, em contrapartida, a AC20 apresentou resistência inferior a ACR, com 0,57 MPa e 0,69 MPa.

De forma geral é possível observar que os resultados indicam que em sua grande maioria que o resíduo de rocha ornamental contribuiu para o ganho de

resistência, exceto nas misturas AC10 submetida a cura normal e a AC20 submetida a cura por imersão, pois nesses casos a resistência foi inferior a ACR.

Conforme mencionado a cura em estufa ocasionou uma redução na resistência das argamassas, no entanto a argamassa AC30 correspondeu aos melhores resultados obtidos de resistência submetidos aos três diferentes tipos de cura. Tal comportamento corrobora com os encontrados anteriormente nas análises das propriedades no estado fresco e de tempo em aberto.

Jo (2020) avaliou a aderência à tração das argamassas modificadas com polímeros, sob diferentes tipos de cura normal, cura por secagem, cura por imersão e cura em estufa. Constatou que as argamassas colantes submetidas a cura em altas temperaturas tendem a diminuir a resistência a resistência à aderência a tração. Concluiu também que independente do polímero ou a quantidade adicionada a argamassa colante, a cura normal foi a que apresentou maior resistência à tração.

Gado (2022) identificou que os melhores resultados de resistência a aderência à tração foram obtidos na cura normal, seguida da cura por imersão. Identificou também que a argamassa contendo a parcela de 10% do resíduo de mármore e granito foi a que obteve a resistência exigida pela norma. O autor identificou também que o principal tipo de ruptura que ocorreu nas argamassas ensaiadas foi entre o revestimento e a argamassa ou na própria argamassa.

Buyuksagis *et al.*, (2017) ao avaliar a resistência a aderência das argamassas colantes com incorporação de resíduos de rochas ornamentais após 28 dias sob a condição de cura normal. Os autores obtiveram resultados de resistência à tração satisfatória para todos os teores de incorporação, inclusive para argamassa de referência. Foi observado um ganho de resistência a partir entre as porcentagens de incorporação de resíduo de 60% a 100%.

Segundo Ribeiro *et al* (2023) entender o comportamento das argamassas colantes quando expostas a determinados ambientes, é fundamental para evitar patologias futuras ocasionadas pelo ambiente ao qual foram expostas pelas pela resistência à aderência das argamassas colantes. Os autores afirmam que as variações de temperatura atuam significativamente para a redução da resistência à aderência das argamassas.

Posteriormente a obtenção dos resultados, os mesmos, foram submetidos a análise estatística e são mostrados a seguir.

Primeiramente, foi avaliado os resultados obtidos no ensaio de resistência conforme Anexo II, a aderência à tração submetido a cura normal conforme indicado nas Tabelas 15 e 16.

Tabela 15: ANOVA do efeito do percentual de resíduo na resistência à aderência – Cura normal

| FV | GL | SQ | QM | F Tabelado | F calculado | Teste |
|-------------|-----------|-----------|-----------|-------------------|--------------------|--------------|
| Tratamentos | 3 | 1,357 | 0,4524 | F (3,52) = 53,92 | <0,0001 | Significante |
| Resíduo | 52 | 0,4362 | 0,008389 | - | - | - |
| Total | 55 | 1,793 | - | - | - | - |

Os resultados da análise de variância ANOVA indicaram que existe uma variação significativa entre os valores obtidos com a execução do ensaio. Sendo assim, posteriormente foi aplicado o teste de Turkey que é apresentado na Tabela 16.

Tabela 16: Teste de Turkey do efeito do percentual de resíduo na resistência à aderência – Cura normal

| Comparações | DMS | I.C. – 95% | Valor P | Significância |
|--------------------|------------|-------------------|----------------|----------------------|
| ACR vs. AC10 | 0,07463 | -0,01004 ; 0,1593 | 0,1023 | Não |
| ACR vs. AC20 | -0,2454 | -0,3496 ; -0,1411 | <0,0001 | Sim |
| ACR vs. AC30 | -0,2888 | -0,3749 ; -0,2027 | <0,0001 | Sim |
| AC10 vs. AC20 | -0,3200 | -0,4253 ; -0,2147 | <0,0001 | Sim |
| AC10 vs. AC30 | -0,3634 | -0,4508 ; -0,2760 | <0,0001 | Sim |
| AC20 vs. AC30 | -0,04342 | -0,1498 ; 0,06301 | 0,7015 | Não |

Os resultados obtidos com a aplicação do teste de Turkey apontam que não existe variação significativa entre as argamassas ACR e AC10, bem como para a composição de AC20 e AC30. No entanto, é observado também as argamassas AC20 e AC30 quando comparadas as outras argamassas possuem efeito significativo sobre essa propriedade. Com isso, entende-se que de fato a incorporação de resíduos de rochas ornamentais proporcionam mudanças nas propriedades da argamassa, e que é considerado um efeito positivo principalmente nas AC20 e AC30.

Após ser analisado os dados de resistência a aderência à tração de argamassas submetidas a cura normal, o mesmo procedimento foi aplicado para

analisar o efeito das argamassas submetidas a cura em estufa e identificados no Anexo III. Os dados da análise estatística são apresentados nas tabelas 17 e 18.

Tabela 17: ANOVA do efeito do percentual de resíduo na resistência a aderência - Cura em estufa

| FV | GL | SQ | QM | F Tabelado | F calculado | Teste |
|-------------|-----------|-----------|-----------|-------------------|--------------------|--------------|
| Tratamentos | 3 | 0,2595 | 0,08650 | F (3,35) = 7,696 | 0,0004 | Significante |
| Resíduo | 35 | 0,3934 | 0,01124 | - | - | - |
| Total | 38 | 0,6529 | - | - | - | - |

Como os resultado da análise estatística ANOVA apontaram que existe uma variação significativa entre os resultados obtidos com a execução do ensaio, foi aplicado o teste de Turkey para identificar com maior detalhamento tal comportamento. Os resultados obtidos com a aplicação do teste de Turkey estão representados na Tabela 18.

Tabela 18: Teste de Turkey do efeito do percentual de resíduo na resistência à aderência - Cura em estufa

| Comparações | DMS | I.C. – 95% | Valor P | Significância |
|--------------------|------------|--------------------|----------------|----------------------|
| ACR vs. AC10 | -0,09581 | -0,2198 ; 0,02817 | 0,1782 | Não |
| ACR vs. AC20 | -0,1928 | -0,3072 ; -0,07830 | 0,0004 | Sim |
| ACR vs. AC30 | -0,1729 | -0,3234 ; -0,02246 | 0,0190 | Sim |
| AC10 vs. AC20 | -0,09694 | -0,2230 ; 0,02913 | 0,1816 | Não |
| AC10 vs. AC30 | -0,07711 | -0,2366 ; 0,08236 | 0,5666 | Não |
| AC20 vs. AC30 | 0,01983 | -0,1324 ; 0,1720 | 0,9849 | Não |

Foi observado após a aplicação do teste de Turkey, que todas os teores de substituição que são discriminados como AC10, AC20 e AC30 apresentaram significativa resultados significativos quando comparado a ACR. Tal fato indica que a incorporação do resíduo na mistura provou mudanças nas suas propriedades e que para cada teor de substituição possuiu o seu grau de importância. No entanto, foi observado também que não ocorreram variações significativas entre os teores de substituição em si, como por exemplo entre a AC20 e a AC30.

A análise estatística foi aplicada também para os resultados obtidos no ensaio de resistência a aderência submetidos a cura por imersão são apresentados no Anexo IV. Os resultados obtidos com essa análise estão representados nas Tabelas 19 e 20.

Tabela 19: ANOVA do efeito do percentual de resíduo na resistência à aderência – Cura por imersão

| FV | GL | SQ | QM | F Tabelado | F calculado | Teste |
|-------------|-----------|-----------|--------------|-------------------|--------------------|--------------|
| Tratamentos | 3 | 0,3321 | 0,1107 | F (3,43) = 15,83 | P<0,0001 | Significante |
| Resíduo | 43 | 0,3007 | 0,0069 93 | - | - | - |
| Total | 46 | 0,6328 | - | - | - | - |

Os resultados obtidos com a análise de variância ANOVA indicam que ocorreu uma variação significativa entre os valores obtidos com a execução do ensaio, sendo assim, foi aplicado o teste de Turkey com o intuito de obter um maior detalhamento com relação a esse comportamento apresentado pelas argamassas ensaiadas. Os resultados obtidos com a aplicação do teste de Turkey estão indicados na Tabela 20.

Tabela 20: Teste de Turkey do efeito do percentual de resíduo na resistência à aderência – Cura por imersão

| Comparações | DMS | I.C. – 95% | Valor P | Significância |
|--------------------|------------|--------------------|----------------|----------------------|
| ACR vs. AC10 | -0,1028 | -0,1824 ; -0,02315 | 0,0067 | Sim |
| ACR vs. AC20 | 0,1230 | 0,02256 ; 0,2234 | 0,0109 | Sim |
| ACR vs. AC30 | -0,09910 | -0,2094 ; 0,01119 | 0,0920 | Não |
| AC10 vs. AC20 | 0,2258 | 0,1323 ; 0,3192 | <0,0001 | Sim |
| AC10 vs. AC30 | 0,003667 | -0,1004 ; 0,1077 | 0,9997 | Não |
| AC20 vs. AC30 | -0,2221 | -0,3428 ; -0,1014 | <0,0001 | Sim |

O teste de Turkey apontou que existem variações significativas entre as argamassas estudadas, exceto entre as combinações de ACR e AC30, e para as argamassas da combinação AC10 e AC30. Tal comportamento indica que as AC10 e AC20 são as que apresentam maior significância quando comparadas a ACR. Entretanto, os valores de resistência obtidos para as AC30 tendem a mostrar um potencial quanto a teor de substituição para a produção de argamassas colantes, conforme resultados obtidos na propriedade analisada.

5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões referentes aos ensaios desenvolvimento desta pesquisa, e as sugestões para estudos futuros relacionados ao tema.

5.1. CONCLUSÃO GERAL

Esta pesquisa teve como propósito avaliar a viabilidade da utilização de resíduos do beneficiamento de rochas ornamentais para a produção de argamassas colantes.

Dentre as propriedades analisadas, foi possível observar que a incorporação do resíduo em substituição parcial a areia para produção das argamassas colantes ensaiadas não ocasionou perda de resultado entre as propriedades avaliadas.

Foi possível observar que o material atuou de forma positiva contribuindo para o ganho de resistência à aderência a tração.

De forma geral, após a execução do programa experimental e análise dos resultados obtidos pode-se concluir que:

- O material conseguiu cumprir o papel ao qual foi submetido, de atuar como agregado miúdo para produção de argamassas colantes;
- A incorporação do resíduo de rochas ornamentais foi responsável pela redução do percentual de teor de ar incorporado na mistura de forma gradual;
- O aumento no percentual de substituição do agregado miúdo pelo resíduo contribuiu para a redução do deslizamento das argamassas ensaiadas;
- As argamassas ensaiadas não alcançaram o deslizamento exigido pela norma de 2 mm, no entanto, a argamassa com 30% de substituição alcançou 2,11 mm, chegando ao valor muito próximo ao exigido pela norma;
- Foi observado uma correlação entre os resultados obtidos nos ensaios para determinação das propriedades de densidade de massa e teor de ar incorporado;
- As argamassas submetidas a cura normal apresentaram os maiores valores de resistência à aderência a tração;

- Os resultados apontaram que as argamassas colantes produzidas podem ser classificadas em argamassas do tipo ACI e ACII, pois obtiveram resistência superior a 0,5 MPa;
- De forma geral, as argamassas com 30% de substituição da areia pelo resíduo de rocha ornamental apresentaram resultados satisfatórios ao final desta pesquisa.

5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados obtidos nesta pesquisa, são sugeridos estudos futuros com o intuito de aprofundar o entendimento quanto a utilização de resíduos da indústria do beneficiamento de rochas ornamentais como agregado miúdo para produção de argamassas colantes:

- Análise do resíduo como adição, ao invés de substituição, em baixos percentuais em argamassas colantes;
- Análise da variação da relação água/resíduo nas misturas;
- Análise da condutividade térmica e do coeficiente de dilatação térmica das argamassas com incorporação de resíduo;
- Análise de parâmetros relativos à durabilidade das argamassas produzidas com este resíduo, tais como permeabilidade a cloretos, resistência a sulfatos e carbonatação;

6. REFERÊNCIAS

----- NBR 15012: Rochas para revestimento de edificações - Terminologia: Rio de Janeiro, 2003.

----- NBR 13277: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da retenção de água: Rio de Janeiro, 2005.

----- 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, 2005.

----- NBR 13281: Argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos: NBR 13281. Rio de Janeiro, 2005.

----- NBR 14081-1: Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas: NBR 14081-1. Rio de Janeiro, 2012

----- NBR 14081-2: Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas – Parte 2: Execução do substrato padrão e aplicação de argamassa para ensaio: Rio de Janeiro, 2015.

----- NBR 14081-3: Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas – Parte 3: Determinação do tempo em aberto: Rio de Janeiro, 2012.

----- NBR 14081-4: Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas – Determinação a resistência de aderência à tração: Rio de Janeiro, 2012.

----- NBR 14081-5: Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas – Parte 5: Determinação do deslizamento: Rio de Janeiro, 2012.

----- NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos: Rio de Janeiro, 2018.

----- NBR 13528: Revestimento de paredes de argamassas inorgânicas – Determinação da resistência de aderência à tração – Parte 2: Aderência ao substrato: Rio de Janeiro, 2019

----- NBR 17054: Determinação da composição Granulométrica – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2022.

----- NBR 7711: Agregados para concreto: Rio de Janeiro, 2022.

Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais (ABIROCHAS). O setor brasileiro de rochas ornamentais. Apresentação em reunião na APEX, Brasília. Ano: 2017. Disponível em: (<https://abirochas.com.br>). Acessado em (15 de agosto de 2023).

_____Relatório Anual e Balanço das Exportações e Importações Brasileiras de Rochas Ornamentais, Associação Brasileira de Rochas, 1-35p. 2023

_____Tipologia das Rochas Ornamentais, Associação Brasileira de Rochas, 1-11p. 2018.

Alencar, C.R.A.; Caranassios, A.; Carvalho, D. (1996) Tecnologias de lavra e beneficiamento: estudo econômico sobre rochas ornamentais. Fortaleza: Ed. Instituto Euvaldo Lodi. 225p.

Almeida, N., Branco, F., Santos, J. R. (2007) Recycling of stone slurry in industrial activities: Application to concrete mixtures. Building and Environment, vol. 42. 810- 819p.

Almeida, S. M., (2012) *Análise do módulo de elasticidade estático e dinâmico do concreto de cimento Portland através de ensaios de compressão simples e de frequência ressonante*. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Belo Horizonte – MG, Universidade Federal de Minas Gerais.

Alonso, M. M., Gismera, S., Blanco, M. T., Lanzón, M., Puertas, F, (2017) *Alkaliactivated mortars: Workability and rheological behaviour*, Construction and Building Materials, v. 145, 576-587p.

Azevedo, A. R. G.; Alexandre, J.; Marvila, M. T.; Zanelato, E. B.; (2017) Influence of incorporation of glass waste on the rheological properties of adhesive mortar, Construction and Building Materials, 359-368p.

Azevedo, A. R. G., França, B. R., Alexandre, J., Marvila, M. T., Zanelato, E. B., Xavier, G. C, (2018) *Influence of sintering temperature of a ceramic substrate in mortar adhesion for civil construction*, Journal of Building Engineering, v.19, 342–348p.

Bacarji, E., Toledo Filho, R. D., Koenders, E. A. B., Figueiredo, E. P., Lopes, J. L. M. P, (2023) *Sustainability perspective of marble and granite residues as concrete fillers*, Construction and Building Materials, v. 45, 1-10p.

Bentlemsan, N., Yahiaoui, W., Kenai, D., (2023) *Strength and durability of self-compacting mortar with waste marble as sand substitution*, Case Studies in Construction Materials, v. 19, 02331p.

Barreto, L. S. S., Ghisi, E, Godoi, C., Oliveira, F. J. S, (2020) *Reuse of ornamental rock solid waste for stabilization and solidification of galvanic solid waste: Optimization for sustainable waste management strategy*, Journal of Cleaner Production, v. 275, 122996p.

Botelho, L. C. G., Xavier, G. C., Paes, A. L. C., Azevedo, A. R. G. (2023) *Lime replacement by finely ground clay from the north fluminense region of RJ in mortar for coating walls and ceilings*, Journal of Materials Research and Technology Open access, v. 23, 5105-5114p.

Buyuksagis, I. S.; Uygunoglu. T.; Tatar, E. (2017) *Investigation on the usage of waste marble powder in cement-based adhesive mortar*, Construction and Building Materials, v. 154, 734-742p.

Carasek, H. (1996) *Aderência de Argamassas a Base de Cimento Portland a Substratos Porosos – Avaliação dos Fatores Intervenientes e Contribuição ao Estudo do Mecanismo de Ligação*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – São Paulo – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 285p.

Carasek, H.; Argamassas. In. Isaia, G. C. (2010) *Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*. 2. ed. v.1. São Paulo: IBRACON, 2010. p. 893-943.

Carasek, H.; Cascudo, O.; Scartezini, L. M. (2001) Importância dos materiais na aderência dos revestimentos de argamassa, n. Anais IV SBTA, Brasília – DF. 44-49p.

Costa, M. R. M. M. (2006) *Análise comparativa de argamassas colantes de mercado através de parâmetros reológicos*. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – São Paulo – SP , Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP, 190-200p.

Destefani, A. Z. (2009) Adição de resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais para a produção de blocos prensados de encaixe. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Federal do Norte Fluminense- UENF.

Faria, R. F. (2016) *Análise do Processamento de Rochas Ornamentais por meio da caracterização de materiais: contribuições para avaliação do consumo energético*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Universitário Norte do Espírito Santo.

Faria, R. F., Muniz, E. P., Oliveira, L. G. S., Proveti, J. R. C., Porto, P. S. S, (2017) *Using on site data to study efficiency in industrial granite cutting*, Journal of Cleaner Production, v. 166, 1113-1121p.

Faiyas, A. P. A.; Erich, S. J. F.; Huinink, H. P.; Adan, O.C.G, (2019) *Understanding the water absorption from MHEC modified glue mortar into porous tile: Influence of predrying*, Construction and Building Materials, v. 217, 363-371p.

Fiorito, A. J. S. I. (2010) Manual de Argamassas e Revestimentos: estudos e procedimentos de execução. 2. ed. São Paulo: PINI, 232p.

Fujii-Yamagataa, A. L., Cardoso, F. A., Sarou-Kanian, V., Daubresse, D.; Prat, E., Chaouchea, M. (2019) *Skin formation in adhesive mortars evaluated by MRI and interfacial rheology*, Cement and Concrete Composites, v. 99, 251-261p.

Gado, R. (2022) *The feasibility of recycling marble & granite sludge in the Polymer modified cementitious mortars Part A: In polymer-modified cementitious adhesive mortar*, Process Safety and Environmental Protection, v. 159, 978-991p.

Gokhan, K., Gorhan, G. (2019) *Investigation of usability of quarry dust waste in fly ash-based geopolymers adhesive mortar production*, Construction and Building Materials, v. 217, 498-506p.

Groot, C. J. W. P. (1998) Aspect of mortar – brick on. International Brickland Block Masonry Conference. 175-181p.

Inceoglu, F., Mermer, N. K., Kirmizi, V., Tombas, G. (2021) *Influence of cement with different calcium sulfate phases on cementitious tile adhesive mortars: Microstructure and performance aspects*. Jornal Internacional de Adesão e Adesivos, v. 104, 102744p.

Jo, Y.K., (2020). *Adhesion in tension of polymer cement mortar by curing conditions using polymer dispersions as cement modifier*. Construction and Building Materials, v. 242, 118134p.

Justo-Reinoso, I., Caicedo-Ramirez, A., Srubar, W. V., Hernandez, M. T. (2019) *Fine aggregate substitution with acidified granular activated carbon influences fresh-*

state and mechanical properties of ordinary Portland cement mortars, Construction and Building Materials, v. 207, 59-69p.

Kurklu, G., Gorhan, G. (2019) *Investigation of usability of quarry dust waste in fly ash-based geopolymer adhesive mortar production*. Construction and Building Materials, v. 217, 498-506p.

Kushwaha, P., Chauhan, A. S., Swami, B.L., (2022) *Utilization of waste materials from marble processing industry for sustainable pavement design*, Materials Today: Proceedings, v. 63, 547-552p.

Kherraf, L., Hebhouh, H., Abdelouahed, A., Boughamssa, W. (2022) *Comparative study on the performance of sand-based mortars from marble, floor tile and cinder block waste*. Journal of Building Engineering, v. 45, 103433p.

Leite, F. R., Antunes, M. L. P., Silva, D. A. L., Rangel, E. C., Cruz., N. C. (2021) *An ecodesign method application at the experimental stage of construction materials development: A case study in the production of mortar made with ornamental rock wastes*. Construction and Building Materials, v. 294, 123505p.

Li, L., Liu, K., Chen, B., Wang, R. (2022) *Effect of cyclic curing conditions on the tensile bond strength between the polymer modified mortar and the tile*, Case Studies in Construction Materials, v. 17, 01531p.

Modler, L. E. A., Mahamad, G., Lubeck, A. (2021) *Hardening process of polymeric adhesive mortars: Approach by phase angle analysis from oscillatory rheometry*. Construction and Building Materials, v. 271, 121521p.

Nayak, S. K., Satapathy, A., Mantry, S., (2022) *Use of waste marble and granite dust in structural applications: A review*, Journal of Building Engineering, v. 46, 103742p.

Nicolini, A., Rodrigues., A. V., Bragança, S. R., Jacobi, M. M. (2022) *Evaluation of Latex Polymeric mortar properties for laying bricks in non-structural masonry*. Journal of Building Engineering, v. 59, 105080p.

Ohama, Y. (1984) Polymer-modified mortars and concretes. Concrete Admixtures Handbook. New Jersey.337-429p.

Oggu, A.; Sai Madupu, I. N. K. (2022) *Study on properties of porous concrete incorporating aloe vera and marble waste powder as a partial cement replacement*, Materials Today: Proceedings, v. 52, 1946-1951p.

Pereira, C., Bauer, E, (2013) *Avaliação da perda de água de argamassas de revestimento por evaporação e por absorção do substrato*. In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, 10, Anais. Fortaleza, SBTA.

Pereira, M. M. L., Capuzzo, V. M. S. S. M., Lameiras, R, M. (2022) *Evaluation of use of marble and granite cutting waste to the production of self-compacting concrete*, Construction and Building Materials, v. 345, 128261p.

Póvoas, Y. V. (1999) Tempo em aberto da argamassa colante: método da mediana e influência dos aditivos HEC e Resina PVAc. Escola Plitécnica da USP. São Paulo. 156p.

Ribeiro, R. P., Sichieri, E. P., Alves, D. T., Xavier, G. C., Azevedo, A. G., Monteiro, S. N. (2023) *Adherence of Brazilian dimension stones by mortar adhesion: influence of temperature*. Journal of Materials Research and Technology, v.24, 8547-8557p.

Ror, C. K., Tejyan, S.; Kumar, N, (2022) *Effect of marble dust reinforcement in composites for different applications: A review*, Materials Today: Proceedings, v. 60, 1120-1124p.

Sánchez, R. A.; Sánchez-polo, M.; Rozalen, M, (2019) *Waste marble dust: An interesting residue to produce cement*, Construction and Building Materials, v, 224, 99-108p.

Silva, C. O. (2003) Análise crítica dos requisitos e critérios de qualidade da argamassa colante, São Paulo. 45-61p.

Silva, A. A. A. (2011) *Gestão de resíduos na indústria de rochas ornamentais, com enfoque para a lama abrasiva*. In: Congresso Nacional de Excelência em Gestão, 7. Anais. Rio de Janeiro: CNEG.

Silva, M. C. A.; Leão, V. A.; Reis, E. L. (2021) *Incorporation of quartzite fines in the production of red ceramics*, Journal of Cleaner Production, v. 288, 125098p.

Travincas, R., Torres, I., Flores-Colen, I., Francisco, M., Bellei. (2023) *The influence of the substrate type on the performance of an industrial cement mortar for general use*. Journal of Building Engineering, v. 73, 106784p.

Vardhan, K.; Goyal, S.; Siddique, R.; Singh, M. (2015) *Mechanical properties and microstructural analysis of cement mortar incorporating marble powder as partial replacement of cement*, Construction and Building Materials, v. 96. 615-621p.

Vidal, F.W.H., Azevedo, H.C.A., Castro, N. F. (2014) Tecnologia de rochas ornamentais: pesquisa, lavra e beneficiamento. Centro e Tecnologia Mineral. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 700p.

Zanelato, E. B. (2019) Influência da superfície da superfície dos blocos cerâmicos na aderência de argamassas e proposta de uma nova morfologia de ancoragem. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF, 6-16p.

Apêndice I - Planilha de ensaio de resistência de aderência à tração (MPa) – Cura Normal

| ACR | Tipo Ruptura | AC10 | Tipo Ruptura | AC20 | Tipo Ruptura | AC30 | Tipo Ruptura |
|------|--------------|------|--------------|------|--------------|------|--------------|
| 0,00 | F - 0 | 0,75 | A/P - 75 | 0,89 | A/F - 90 | 0,99 | A/F - 80 |
| 0,56 | A -100 | 0,76 | A/P - 90 | 1,29 | A/F - 90 | 0,78 | A - 100 |
| 0,63 | A -100 | 0,72 | A/P - 90 | 0,97 | A/F - 90 | 0,74 | A - 100 |
| 0,38 | A -100 | 0,93 | A/P - 90 | 0,94 | A - 100 | 1,12 | A - 100 |
| 0,51 | F - 0 | 1,06 | A/P - 65 | 1,33 | A - 100 | 0,75 | A - 100 |
| 0,90 | A -100 | 1,08 | A/P -90 | 0,00 | F - 0 | 0,89 | A - 100 |
| 0,00 | F - 0 | 1,01 | A/P - 95 | 1,23 | A - 100 | 0,96 | A - 100 |
| 0,00 | F - 0 | 0,56 | A/P - 85 | 1,57 | A - 100 | 0,87 | A - 100 |
| 0,74 | A -100 | 0,52 | A/P - 80 | 1,44 | A - 100 | 0,80 | A - 100 |
| 0,56 | A/P -50 | 0,64 | A - 100 | 1,44 | A/F - 90 | 0,81 | A - 100 |
| 0,66 | A - 100 | 0,73 | A/P - 70 | 0,46 | A - 100 | 0,96 | A/F - 80 |
| 0,54 | A -100 | 0,53 | A -100 | 0,72 | A - 100 | 1,19 | A/F - 90 |
| 0,61 | S/A - 90 | 0,54 | A/P - 75 | 0,88 | A/F - 90 | 0,98 | A/F - 80 |
| 0,91 | S/A - 91 | 0,74 | A/P - 80 | 0,81 | A/F - 90 | 1,06 | A/F - 70 |
| 0,80 | S/A - 92 | 0,66 | A -100 | 0,73 | A/F - 50 | 0,75 | A/F - 70 |
| 0,34 | A -100 | 0,53 | A -100 | 0,75 | A - 100 | 0,69 | A/F - 70 |
| 0,95 | A - 100 | 0,53 | A -100 | 0,97 | A/F - 90 | 0,75 | A/F - 70 |
| 0,69 | A - 101 | 0,62 | A -102 | 0,73 | S/A - 70 | 1,05 | A/F - 90 |
| 0,71 | A - 102 | 0,62 | A -103 | 1,08 | S/A - 90 | 1,26 | A - 100 |
| 0,58 | S/A - 80 | 0,90 | A -104 | 1,20 | S/A - 80 | 1,26 | A - 100 |
| 0,76 | A - 100 | 0,52 | A/P - 75 | 0,88 | A - 100 | 0,58 | A/F - 70 |
| 0,77 | A - 100 | 0,53 | A/P - 90 | 0,88 | A - 100 | 1,12 | A/F - 80 |
| 0,82 | S/A - 80 | 0,58 | A/P - 75 | 0,90 | A - 100 | 1,20 | A/F - 90 |
| 0,77 | A - 100 | 0,75 | A/P - 85 | 0,70 | A - 100 | 1,07 | A/F - 80 |
| 0,75 | S/A - 80 | 0,54 | A/P - 80 | 1,45 | A - 100 | 1,00 | A/F - 70 |
| 0,52 | A - 100 | 0,70 | A/P - 85 | 0,49 | A - 100 | 1,49 | A - 100 |
| 0,63 | S/A - 90 | 0,47 | A/P - 90 | 1,40 | A - 100 | 0,57 | A/F - 80 |
| 0,72 | S/A - 90 | 0,47 | A/P - 80 | 1,07 | A - 50 | 1,29 | A - 100 |
| 0,75 | S/A - 90 | 0,65 | A/P - 92 | 1,29 | A -100 | 1,13 | A/F - 80 |
| 0,89 | S/A - 90 | 0,58 | A/P - 100 | 0,98 | A - 100 | 1,31 | A - 100 |

Apêndice II - Planilha de ensaio de resistência de aderência à tração (MPa) – Cura por Imersão

| ACR | Tipo Ruptura | AC10 | Tipo Ruptura | AC20 | Tipo Ruptura | AC30 | Tipo Ruptura |
|------|--------------|------|--------------|------|--------------|------|--------------|
| 0,91 | A/P - 80 | 0,00 | F - 0 | 0,40 | A/P - 80 | 0,44 | A - 100 |
| 1,06 | A - 100 | 0,78 | A - 100 | 0,53 | A/P - 70 | 0,97 | A/P - 80 |
| 0,63 | A/P - 70 | 0,00 | F - 0 | 0,69 | A/P - 90 | 0,52 | A - 100 |
| 0,73 | A/P - 80 | 0,94 | A/P - 90 | 0,45 | A/P - 80 | 0,36 | A - 100 |
| 0,84 | A/P - 70 | 0,83 | A/P - 90 | 0,54 | A/P - 70 | 0,97 | A/P - 90 |
| 0,57 | A/P - 70 | 0,72 | A/P - 70 | 0,48 | A/P - 90 | 0,78 | A/P - 90 |
| 0,74 | A - 100 | 0,75 | A/P - 70 | 0,38 | A/P - 80 | 0,37 | A - 100 |
| 0,83 | A/P - 80 | 0,79 | A/P - 50 | 0,39 | A/P - 90 | 1,04 | A/P - 90 |
| 0,70 | A/P - 60 | 0,50 | A/P - 50 | 0,33 | A/P - 80 | 0,60 | A/P - 70 |
| 0,95 | A - 100 | 0,98 | A/P - 90 | 0,00 | F - 0 | 0,35 | A - 100 |
| 1,05 | A/P - 50 | 0,88 | A - 100 | 0,71 | A/P - 90 | 0,71 | A - 100 |
| 0,69 | A/P - 75 | 0,00 | F - 0 | 0,51 | A/P - 80 | 1,04 | A/P - 90 |
| 0,78 | A - 100 | 1,03 | A/P - 90 | 0,73 | A/P - 70 | 0,71 | A/P - 80 |
| 0,67 | A/P - 75 | 0,94 | A/P - 90 | 0,42 | A/P - 90 | 0,89 | A/P - 70 |
| 0,55 | A/P - 75 | 1,05 | A/P - 90 | 0,77 | A/P - 90 | 1,01 | A/P - 80 |
| 0,68 | A - 100 | 0,76 | A/P - 70 | 0,84 | A/P - 90 | 0,67 | A - 100 |
| 0,57 | A/P - 75 | 0,82 | A/P - 70 | 0,00 | F - 0 | 0,55 | A - 100 |
| 0,78 | A/P - 75 | 0,88 | A/P - 80 | 0,67 | A/P - 80 | 0,91 | A/P - 90 |
| 0,81 | A/P - 80 | 0,00 | F - 0 | 0,52 | A/P - 80 | 0,60 | A/P - 90 |
| 0,53 | A - 100 | 0,00 | F - 0 | 0,98 | A/P - 90 | 1,01 | A/P - 90 |
| 0,52 | A - 100 | 0,71 | A - 100 | 0,86 | A/P - 90 | 1,32 | A/P - 90 |
| 0,53 | A/P - 80 | 0,47 | A/P - 90 | 0,59 | A/P - 90 | 1,30 | A/P - 80 |
| 0,58 | A/P - 70 | 0,77 | A/P - 80 | 0,87 | A/P - 90 | 0,84 | A/P - 70 |
| 0,75 | A/P - 70 | 0,73 | A/P - 80 | 0,75 | A/P - 80 | 1,00 | A/P - 70 |
| 0,54 | A/P - 80 | 0,64 | A/P - 90 | 0,83 | A/P - 70 | 0,78 | A - 100 |
| 0,70 | A/P - 75 | 0,69 | A/P - 90 | 0,57 | A/P - 60 | 1,22 | A/P - 80 |
| 0,47 | A/P - 70 | 0,67 | A/P - 70 | 0,55 | A/P - 50 | 1,13 | A/P - 90 |
| 0,47 | A/P - 70 | 0,82 | A/P - 80 | 0,45 | A/P - 70 | 0,78 | A/P - 80 |
| 0,65 | A/P - 70 | 0,80 | A/P - 90 | 0,60 | A/P - 80 | 1,45 | A/P - 80 |
| 0,58 | A/P - 70 | 0,67 | A/P - 80 | 0,69 | A/P - 80 | 0,35 | A - 100 |

Apêndice III – Planilha de ensaio de resistência de aderência à tração (MPa) – Cura em Estufa

| ACR | Tipo Ruptura | AC10 | Tipo Ruptura | AC20 | AC30 | Subst. 30% | Tipo Ruptura |
|------|--------------|------|--------------|------|----------|------------|--------------|
| 0,22 | A/P - 50 | 0,42 | A/P - 50 | 0,90 | A/P -80 | 0,62 | A/P - 90 |
| 0,47 | A/P - 70 | 0,70 | S/A - 90 | 0,93 | S/A - 90 | 0,60 | A/P - 90 |
| 0,46 | A/P - 90 | 0,62 | S/A - 90 | 0,91 | A/P -80 | 0,64 | A/P - 90 |
| 0,52 | A/P - 80 | 0,58 | A/P - 50 | 0,77 | A/P -70 | 0,61 | A/P - 90 |
| 0,46 | A/P - 90 | 0,66 | A/P - 50 | 0,83 | A/P - 90 | 0,55 | A/P - 90 |
| 0,66 | A/P - 90 | 0,67 | S/A - 90 | 1,23 | S/A - 90 | 0,39 | A/P - 90 |
| 0,62 | A/P - 90 | 0,62 | S/A - 80 | 1,05 | A/P - 90 | 0,31 | A/P - 70 |
| 1,12 | A/P - 90 | 0,54 | S/A - 80 | 1,09 | A/P - 90 | 0,36 | A/P - 70 |
| 0,67 | A/P - 80 | 0,52 | S/A - 80 | 1,20 | S/A - 90 | 0,29 | A/P - 70 |
| 0,74 | A/P - 80 | 0,75 | S/A - 80 | 1,01 | A/P - 90 | 0,74 | A - 100 |
| 0,82 | A/P - 90 | 1,06 | A/P - 70 | 0,71 | A/P - 90 | 0,43 | A/P - 80 |
| 0,64 | A/P - 90 | 0,86 | A/P - 90 | 0,00 | F - 0 | 0,85 | A/P - 90 |
| 0,51 | A/P - 90 | 0,46 | A/P - 90 | 0,83 | A/P - 90 | 0,16 | A - 100 |
| 0,63 | A/P - 90 | 0,66 | A/P - 80 | 0,69 | A/P - 90 | 0,46 | A - 100 |
| 0,41 | A/P - 90 | 0,55 | A/P - 80 | 0,00 | F - 0 | 0,00 | F - 0 |
| 0,55 | A/P - 90 | 0,66 | A/P - 80 | 0,00 | F - 0 | 0,00 | F - 0 |
| 0,56 | A/P - 90 | 0,96 | A/P - 80 | 0,53 | A/P - 80 | 0,00 | F - 0 |
| 0,80 | A/P - 90 | 0,96 | A/P - 90 | 0,64 | A/P - 80 | 0,00 | F - 0 |
| 0,85 | A/P - 90 | 0,89 | S/A - 90 | 0,67 | A/P - 80 | 0,00 | F - 0 |
| 0,75 | A/P - 90 | 1,20 | S/A - 90 | 0,56 | A/P - 80 | 0,33 | A - 100 |
| 0,35 | A - 100 | 0,84 | A/P - 80 | 0,62 | A/P - 90 | 0,58 | A/P - 90 |
| 0,57 | A/P - 90 | 0,33 | A/P - 50 | 0,62 | A/P - 90 | 1,12 | A/P - 90 |
| 0,47 | A/P - 90 | 0,53 | A/P - 90 | 0,79 | A/P - 90 | 1,20 | S/A - 100 |
| 0,38 | A - 100 | 0,82 | A/P - 70 | 0,72 | A/P - 70 | 1,07 | A/P - 90 |
| 0,56 | A/P - 90 | 0,71 | A/P - 70 | 0,98 | A/P - 90 | 1,00 | A/P - 90 |
| 0,69 | A/P - 90 | 0,65 | A/P - 60 | 0,71 | A/P - 70 | 1,49 | S/A - 100 |
| 0,68 | A/P - 90 | 0,77 | A/P - 90 | 0,79 | A/P - 90 | 0,57 | A/P - 90 |
| 0,56 | A/P - 90 | 0,80 | A/P - 90 | 0,78 | S/A - 90 | 1,29 | S/A - 100 |
| 0,60 | A/P - 80 | 0,36 | A/P - 50 | 0,53 | A/P - 70 | 1,13 | A/P - 90 |
| 0,57 | A/P - 80 | 0,93 | S/A - 90 | 1,45 | S/A - 90 | 1,31 | A/P - 90 |

Anexo I – Planilha resumo dos dados utilizados na análise estatística (ANOVA) – Ensaio de tempo em aberto (MPa)

| | Misturas | | | |
|------------|----------|------|------|------|
| | ACR | AC10 | AC20 | AC30 |
| Repetições | 0,56 | 0,72 | 0,88 | 0,99 |
| | 0,63 | 0,73 | 0,81 | 0,78 |
| | 0,56 | 0,53 | 0,97 | 0,89 |
| | 0,66 | 0,54 | 0,88 | 0,96 |
| | 0,54 | 0,74 | 0,88 | 0,87 |
| | 0,61 | 0,66 | 0,9 | 0,8 |
| | 0,8 | 0,53 | 1,07 | 0,81 |
| | 0,69 | 0,53 | 0,98 | 0,96 |
| | 0,71 | 0,62 | - | 0,98 |
| | 0,58 | 0,62 | - | 1,06 |
| | 0,76 | 0,52 | - | 1,05 |
| | 0,77 | 0,53 | - | 1,12 |
| | 0,82 | 0,58 | - | 1,07 |
| | 0,77 | 0,54 | - | 1 |
| | 0,75 | 0,65 | - | 1,13 |
| | 0,63 | 0,58 | - | - |
| | 0,72 | - | - | - |
| | 0,75 | - | - | - |

Anexo II – Planilha resumo dos dados utilizados na análise estatística (ANOVA) – Ensaio de resistência a aderência tração – Cura Normal (MPa)

| | Misturas | | | |
|------------|----------|------|------|------|
| | ACR | AC10 | AC20 | AC30 |
| Repetições | 0,56 | 0,72 | 0,88 | 0,99 |
| | 0,63 | 0,73 | 0,81 | 0,78 |
| | 0,56 | 0,53 | 0,97 | 0,89 |
| | 0,66 | 0,54 | 0,88 | 0,96 |
| | 0,54 | 0,74 | 0,88 | 0,87 |
| | 0,61 | 0,66 | 0,9 | 0,8 |
| | 0,8 | 0,53 | 1,07 | 0,81 |
| | 0,69 | 0,53 | 0,98 | 0,96 |
| | 0,71 | 0,62 | - | 0,98 |
| | 0,58 | 0,62 | - | 1,06 |
| | 0,76 | 0,52 | - | 1,05 |
| | 0,77 | 0,53 | - | 1,12 |
| | 0,77 | 0,58 | - | 1,07 |
| | 0,75 | 0,54 | - | 1 |
| | 0,63 | 0,65 | - | 1,13 |
| | 0,72 | 0,58 | - | - |
| | 0,75 | - | - | - |

Anexo III – Planilha resumo dos dados utilizados na análise estatística (ANOVA) – Ensaio de resistência a aderência tração – Cura em Estufa (MPa)

| | Misturas | | | |
|------------|----------|------|------|------|
| | ACR | AC10 | AC20 | AC30 |
| Repetições | 0,52 | 0,7 | 0,9 | 0,6 |
| | 0,66 | 0,62 | 0,93 | 0,61 |
| | 0,62 | 0,66 | 0,91 | 0,55 |
| | 0,67 | 0,67 | 0,83 | 1,07 |
| | 0,64 | 0,62 | 0,71 | 1 |
| | 0,63 | 0,71 | 0,69 | - |
| | 0,55 | 0,65 | 0,67 | - |
| | 0,56 | 0,77 | 0,79 | - |
| | 0,57 | 0,8 | 0,72 | - |
| | 0,56 | - | 0,71 | - |
| | 0,56 | - | 0,79 | - |
| | 0,6 | - | 0,78 | - |
| | 0,57 | - | - | - |

Anexo IV – Planilha resumo dos dados utilizados na análise estatística (ANOVA) – Ensaio de resistência a aderência tração – Cura por Imersão (MPa)

| | Misturas | | | |
|------------|----------|------|------|------|
| | ACR | AC10 | AC20 | AC30 |
| Repetições | 0,73 | 0,91 | 0,53 | 0,71 |
| | 0,74 | 0,73 | 0,54 | 0,71 |
| | 0,7 | 0,84 | 0,48 | 0,89 |
| | 0,69 | 0,74 | 0,67 | 0,67 |
| | 0,78 | 0,83 | 0,59 | 0,91 |
| | 0,67 | 0,7 | 0,57 | 0,84 |
| | 0,68 | 0,95 | 0,55 | 0,71 |
| | 0,57 | 0,88 | 0,6 | - |
| | 0,78 | 0,94 | - | - |
| | 0,81 | 0,76 | - | - |
| | 0,58 | 0,82 | - | - |
| | 0,65 | 0,88 | - | - |
| | 0,58 | 0,71 | - | - |
| | - | 0,77 | - | - |
| | - | 0,73 | - | - |
| | - | 0,69 | - | - |
| | - | 0,67 | - | - |
| | - | 0,82 | - | - |
| | - | 0,8 | - | - |
| | - | 0,67 | - | - |