

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS  
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL  
NÍVEL MESTRADO**

**RORENNYCHOLLAS FERREIRA MELO**

**INFLUÊNCIA DE RESÍDUOS DE ROCHAS ORNAMENTAIS NAS  
PROPRIEDADES DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO**

**São Leopoldo**

**2020**

RORENNYCHOLLAS FERREIRA MELO

**INFLUÊNCIA DE RESÍDUOS DE ROCHAS ORNAMENTAIS NAS  
PROPRIEDADES DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Orientador: Prof. Dr. Claudio de Souza Kazmierczak

São Leopoldo

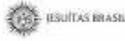
2020

M528i Melo, Rorennychollas Ferreira.  
Influência de resíduos de rochas ornamentais nas propriedades de argamassas de revestimento / por Rorennychollas Ferreira Melo. – 2020.  
136 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) — Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, São Leopoldo, RS, 2020.  
“Orientador: Dr. Claudio de Souza Kazmierczak”.

1. Resíduos. 2. Rochas ornamentais. 3. Argamassa de revestimento. 4. Desempenho. 5. Meio ambiente.  
I. Título.

CDU: 691.53:553.5



## ATESTADO

ATESTO, para os devidos fins, conforme consta nos assentamentos da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS, que Rorennychollas Ferreira Melo, aluno do curso de Mestrado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Área de Concentração: Gerenciamento de Resíduos - nível Pós-Graduação Estrito Senso, realizou, em sessão pública, a defesa da Dissertação intitulada "INFLUÊNCIA DE RESÍDUOS DE ROCHAS ORNAMENTAIS NAS PROPRIEDADES DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO", sob orientação do Prof. Claudio de Souza Kazmierczak, defendida no dia 30 de junho de 2020.

ATESTO, ainda, que a banca avaliadora foi constituída por:

- Prof<sup>ª</sup>. Regina Celia Espinosa Modolo
- Prof. Daniel Tregnago Pagnussat

-----

São Leopoldo, 7 de julho de 2020.

Luciana Curra  
Gerente de Serviços Acadêmicos

## **AGRADECIMENTO**

Agradeço a DEUS por me conduzir em toda a minha jornada, por ser sempre o autor do meu destino, por me amparar em todas as minhas dificuldades e por sempre me fazer perseverante. “As pessoas podem fazer seus planos, porém é o SENHOR Deus quem dá a última palavra”; por isso agradeço a Ele e à Nossa Senhora, por serem meu conforto em todo momento em que estive longe de minha família, em busca dos meus sonhos, e por estarem presentes em todos os momentos, tanto nos felizes quanto nos difíceis.

Agradeço aos meus pais e minhas irmãs por sempre me conduzirem à realização de meus sonhos, por serem sempre meu apoio em momentos difíceis, pela nossa união e por confiarem em minha capacidade. Agradeço especialmente à minha mãe, pela dedicação em fazer o máximo pelos seus filhos, por ser nosso apoio e nossa conselheira, por ser a voz que nos impede de desistir de nossos objetivos e por sempre rezar pelos seus filhos.

À minha namorada, Monique, por ser minha melhor amiga e companheira em tudo que eu faço, por ser meu apoio, por acreditar em nossos sonhos e por me confortar em todos os momentos.

Ao meu orientador, Professor Dr. Claudio de Souza Kazmierczak, por transmitir seus conhecimentos de forma clara para facilitar o meu entendimento. Agradeço-lhe também a paciência e disponibilidade em me conduzir ao aprimoramento de meus conhecimentos durante todo meu trabalho. A ele, minha imensa gratidão.

Agradeço a todos que fizeram parte desse trabalho, especialmente aos laboratoristas do laboratório de materiais de construção da UNISINOS, Igor, Léo, Bianca e Jeremias, e aos bolsistas, Nicolas e Cristiano. Obrigado pelo companheirismo, pelo aprendizado e pela ajuda que obtive de todos vocês.

Agradeço à marmoraria Ranzan Pedras, por fornecer os resíduos de rochas ornamentais para a realização do meu trabalho.

A todos, meu muito obrigado!

Bendito o homem que confia no Senhor, e cuja confiança é o Senhor. Porque será como a árvore plantada junto às águas, que estende as suas raízes para o ribeiro, e não receia quando vem o calor, mas a sua folha fica verde; e no ano de sequeidão não se afadiga, nem deixa de dar fruto (Jeremias 17:7,8).

## RESUMO

A reutilização do resíduo de rochas ornamentais pode propiciar benefícios a matrizes cimentícias, proporcionando um melhor destino para o mesmo. O presente trabalho apresenta resultados da substituição parcial de cimento por resíduos de rochas ornamentais (lama). A substituição ocorreu em argamassas de revestimento, confeccionadas com cimento CP-V ARI, no traço 1:1:6 (cimento, cal, areia). O teor de água foi definido em função da consistência (fixada em  $260 \pm 5$  mm). O potencial para melhoria das propriedades da argamassa foi avaliado a partir da determinação de sua distribuição granulométrica, da superfície específica e da possibilidade do resíduo a gerar nucleação. As diferenças nas propriedades da argamassa de revestimento foram avaliadas no estado fresco, endurecido e na forma de revestimento. No estado fresco, foram determinadas as seguintes propriedades: consistência (mesa de espalhamento), retenção de água e densidade de massa. No estado endurecido, foram determinadas as seguintes propriedades: resistência à compressão e à tração, densidade de massa, variação volumétrica, módulo de elasticidade, absorção de água por imersão, índice de vazios e absorção de água por capilaridade. No revestimento, foi avaliado a resistência de aderência por tração da argamassa aplicada em bloco cerâmico. Observa-se que a substituição do cimento por resíduos de rochas ornamentais influenciou as argamassas através do efeito filer, atuando no efeito físico, melhorando o empacotamento granulométrico das argamassas substituídas. Os resultados indicam que o melhor teor de substituição foi de 15% do cimento por resíduos de rochas ornamentais. A substituição não comprometeu o desempenho das propriedades das argamassas produzidas. Desta forma, as argamassas com diferentes teores de substituição obtiveram resultados semelhantes à argamassa referência com menores teores de cimento. Os resultados obtidos indicam que os resíduos de rochas ornamentais têm bom potencial para serem utilizados como filer em matrizes cimentícias.

**Palavras-chave:** Resíduos. Rochas Ornamentais. Argamassa de Revestimento, Desempenho. Meio Ambiente.

## ABSTRACT

The reuse of ornamental rock waste can provide benefits to cementitious matrices, providing a better destination for it. The following paper studies the partial replacement of cement by residual ornamental rocks (mud). The replacement took place in coating mortars, made with CP-V ARI cement, in the 1:1:6 line (cement, lime, sand). The water content was defined according to the consistency (fixed at  $260 \pm 5$  mm). The potential for improving the properties of the mortar was evaluated from the determination of its granulometric distribution, the specific surface and the possibility of the waste to generate nucleation. The differences in the properties of the coating mortar were evaluated in the fresh and hardened state, and in the coating form. In the fresh state, the following properties were determined: consistency (spreading table), water retention and mass density. In the hardened state, the following properties were determined: compressive and tensile strength, mass density, volumetric variation, modulus of elasticity, water absorption by immersion, void index and water absorption by capillarity. In the coating, the tensile bond strength of the mortar applied in a ceramic block was evaluated. It is observed that the replacement of cement by waste of ornamental rocks influenced the mortars through the filler effect, acting on the physical effect, improving the granulometric packaging of the replaced mortars. The results indicate that the best content of substitution was 15% of cement for ornamental rock waste. The substitution did not compromise the performance of the produced mortar properties. Thereby, mortars with different contents of substitution obtained similar results to the reference mortar with lower levels of cement. The results obtained indicate that the ornamental rock waste has good potential to be used as filler in cementitious matrices.

**Keywords:** Waste. Ornamental Rocks. Coating Mortar. Performance. Environment.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Extração dos blocos e gerações de resíduos .....	25
Figura 2 - Corte dos blocos e resíduos gerados dos blocos. ....	25
Figura 3 - Polimento das chapas e resíduos gerados.....	26
Figura 4 - Fluxograma das gerações dos resíduos .....	27
Figura 5 - Imagem de microscopia eletrônica de varredura de resíduos de rochas ornamentais .....	30
Figura 6 - MEV de cimento (a), resíduos de rochas ornamentais sem processo de moagem (b) resíduos de rochas ornamentais moídos (c). ....	31
Figura 7 - Efeito de nucleação .....	36
Figura 8 - Aumento da hidratação pelo efeito de nucleação .....	37
Figura 9 - Produção de calor de hidratação em condições isotérmicas.....	38
Figura 10 - Resistência à compressão de argamassa com resíduos de granito natural e moídos por 12 horas (RGAM12) .....	43
Figura 11 - Resistencia à flexão e axial.....	44
Figura 12 - Densidade de argamassas com resíduos de rochas ornamentais .....	46
Figura 13 - Microscopia eletrônica de varredura de três tipos de argamassa .....	47
Figura 14 - Fluxograma da obtenção do resíduo de rochas ornamentais .....	51
Figura 15 - Lama de rochas ornamentais.....	51
Figura 16 - Resíduos RBRO moídos (a); moinho de rolo (b) .....	52
Figura 17 - Separador manual de calha .....	52
Figura 18 - Resíduos separados e identificados.....	53
Figura 19 - Fluxograma de resíduos de rochas ornamentais.....	53
Figura 20 - Granulometria a laser dos resíduos de rochas ornamentais. ....	54
Figura 21 - Cal maturada por 24 horas .....	62
Figura 22 - Blocos cerâmicos com aplicações do revestimento .....	65
Figura 23- Fluxograma do ensaio de aderência em revestimentos cerâmicos .....	65
Figura 24 - Sistema de aquisição de dados (a); câmara semi-adiabática com sensores termopares(b); câmara fechada em andamento do ensaio(c). ....	67
Figura 25 - Requisitos de densidade de massa no estado fresco NBR 13281 (ABNT, 2005e).....	72
Figura 26 - Retenção de água NBR 13281 (ABNT, 2005e).....	73

Figura 27 - Densidade de massa no estado endurecido NBR 13281 (ABNT, 2005e)	78
.....	78
Figura 28 - Resistência à compressão .....	83
Figura 29 - Resistencia à tração NBR 13281 (ABNT, 2005e).....	86

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Comparativo da distribuição granulométrica dos diferentes componentes e dos traços utilizados.....	69
Gráfico 2 - Ampliação da distribuição granulométrica.....	70
Gráfico 3 - Teor de ar incorporado .....	74
Gráfico 4 - Densidade no estado endurecido .....	76
Gráfico 5 - Módulo de elasticidade .....	79
Gráfico 6 - Resistência à compressão.....	80
Gráfico 7 - Resistência à tração .....	84
Gráfico 8 - Variação dimensional .....	88
Gráfico 9 - Variação de massa .....	90
Gráfico 10 - Resistência de aderência à tração.....	93
Gráfico 11 - Evolução do calor de hidratação das argamassas .....	95
Gráfico 12- Absorção de água por imersão .....	97
Gráfico 13 - Índice de vazios .....	98
Gráfico 14 - Coeficiente de capilaridade.....	100

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Caracterização do agregado miúdo.....	59
Quadro 2 - Caracterização dos materiais finos.....	59
Quadro 3 - Propriedades da argamassa no estado fresco .....	63
Quadro 4 - Argamassas para verificação da evolução de temperatura das reações de hidratação .....	66
Quadro 5 - Resistência potencial de aderência à tração .....	95

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Métodos de separação de resíduos de rochas ornamentais .....	32
Tabela 2 - Difração a laser de cimento e resíduos de rochas ornamentais. ....	33
Tabela 3 - Composição química dos resíduos de rochas ornamentais.....	34
Tabela 4 - Teores de substituições de cimento por resíduos de rochas ornamentais ...	39
Tabela 5 - Resultados da granulometria a laser dos resíduos de rochas ornamentais..	54
Tabela 6 - Elementos químicos presentes nas amostras de resíduos de rochas ornamentais. ....	55
Tabela 7 - Caracterização dos resíduos de rochas ornamentais .....	56
Tabela 8 - Caracterização física e química do cimento .....	57
Tabela 9 - Caracterização física e química da cal .....	58
Tabela 10 - Caracterização do agregado miúdo.....	59
Tabela 11 - Caracterização dos materiais finos da areia .....	60
Tabela 12 - Granulometria areia chapisco.....	60
Tabela 13 - Características físicas dos blocos cerâmicos .....	61
Tabela 14 - Propriedades no estado endurecido .....	63
Tabela 15 - Consistência das argamassas.....	71
Tabela 16 - Densidade no estado fresco .....	72
Tabela 17 - Retenção de água .....	73
Tabela 18 - Teor de ar incorporado .....	74
Tabela 19 - Densidade no estado endurecido .....	76
Tabela 20 - Análise de Variância (ANOVA) e densidade de massa .....	76
Tabela 21 - Módulo de elasticidade.....	78
Tabela 22 - Análise de variância (ANOVA) do módulo de elasticidade .....	79
Tabela 23 - Resistência à compressão .....	80
Tabela 24 - Análise de variância (ANOVA) e resistência à compressão .....	81
Tabela 25 - Resistência à tração.....	84
Tabela 26 - Análise de variância (ANOVA) da resistência à tração .....	84
Tabela 27 - Variação dimensional .....	87
Tabela 28 - Análise de variância (ANOVA) da variação dimensional .....	88
Tabela 29 - Variação de massa .....	89
Tabela 30 - Análise variância (ANOVA) da variação de massa .....	90
Tabela 31 - Resistência de aderência à tração .....	92

Tabela 32 - Análise de variância (ANOVA) e resistência de aderência à tração .....	93
Tabela 33 - análise de variância (ANOVA) da calorimetria .....	96
Tabela 34 - Absorção de água por imersão .....	97
Tabela 35 - Análise de variância (ANOVA) da absorção de água por imersão.....	98
Tabela 36 - Índice de vazios .....	98
Tabela 37 - Análise de variância (ANOVA) do índice de vazio .....	99
Tabela 38 - Coeficiente de capilaridade .....	100
Tabela 39 - Análise de variância (ANOVA) do coeficiente de capilaridade.....	100

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

$\mu\text{m}$	Micrômetro
a/c	Água/cimento
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Al	Alumínio
$\text{Al}_2\text{O}_3$	Óxido de alumínio
ANOVA	Análise de variância
Ba	Bário
$\text{C}_2\text{S}$	silicato dicálcio
$\text{C}_3\text{A}$	aluminato tricálcio
$\text{C}_3\text{S}$	silicato tricálcio
Ca	Cálcio
CAL CH-II	Cal com pureza intermediária
CaO	Óxido de cálcio
CL	Cloro
cm	Centímetros
CP-V ARI	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
C-S-H	Silicatos de Cálcio Hidratados
DRX	Difração de Raio X
Fe	Ferro
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	Óxido de ferro
FRX	Fluorescência de Raio X
GPa	Gigapascal
IEMA	Instituto estadual do meio ambiente
K	Potássio
$\text{K}_2\text{O}$	Óxido de potássio
kg	Quilograma
LCVMAT	Laboratório de Caracterização e Valorização de materiais
Li	Lítio
MEV	Micrografia eletrônica de varredura
MgO	Óxido de magnésio
mm	Milímetros

Mn	Manganês
Mohs	Escara de dureza dos minerais
MPa	Megapascal
NA <sub>2</sub> O	Óxido de sódio
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
NBR	Normas Brasileiras de Regulação
NM	Norma MERCOSUL
R10	Argamassa com 10% de substituição
R10 SEM	Argamassa com apenas cal, cimento e areia, sem os 10% de resíduos
R15	Argamassa com 15% de substituição
R20	Argamassa com 20% de substituição
R15 SEM	Argamassa com apenas cal, cimento e areia, sem os 15% de resíduos
R20 SEM	Argamassa com apenas cal, cimento e areia, sem os 20% de resíduos
RB	Rubídio
RBRO	Resíduos de beneficiamento de rochas ornamentais
RCMG	Resíduos do corte de mármore e granito
RF	Argamassa referência
RGAM	Argamassa com resíduos de granito moídos por 12 horas
RGN	Argamassa com resíduos de granito natural
RILEM	International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures
S	Enxofre
Si	Silício
SiO <sub>3</sub>	Silicato de sódio
SO <sub>3</sub>	Óxido sulfúrico
Sr	Estrôncio
T	Toneladas
TGA	Análise termogravimétrica
Ti	Titânio
UNISINOS	Universidade do Vale do Rio dos Sinos
Y	Ítrio
Zn	Zinco
Zr	Zircônio

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>18</b>
1.2 JUSTIFICATIVA.....	19
1.3 OBJETIVOS.....	20
<b>1.3.1 Objetivo Geral</b> .....	<b>20</b>
<b>1.4.2 Objetivos Específicos</b> .....	<b>20</b>
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>22</b>
2.1 ROCHAS ORNAMENTAIS.....	23
<b>2.1.1 Destinação de Resíduos de Rochas Ornamentais</b> .....	<b>27</b>
<b>2.1.2 Impactos Ambientais</b> .....	<b>28</b>
2.2 CARACTERÍSTICAS DOS RESÍDUOS DE ROCHAS ORNAMENTAIS.....	30
<b>2.2.1 Forma e Textura dos Grãos dos Resíduos do Beneficiamento de Rochas Ornamentais</b> .....	<b>30</b>
<b>2.2.2 Distribuição Granulométrica</b> .....	<b>32</b>
<b>2.2.3 Composição Química dos Resíduos</b> .....	<b>33</b>
<b>3 INFLUÊNCIA DOS RESÍDUOS DE ROCHAS ORNAMENTAIS EM ARGAMASSAS</b>	<b>35</b>
3.1 EFEITO FILER.....	35
3.2 EFEITO DE NUCLEAÇÃO.....	36
3.3 EFEITOS DE DILUIÇÃO.....	38
3.4 TEORES DE SUBSTITUIÇÃO.....	39
3.5 EFEITO DOS RESÍDUOS DE ROCHAS ORNAMENTAIS NAS PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS.....	40
<b>3.5.1 No Estado Fresco</b> .....	<b>41</b>
<b>3.5.2. No Estado Endurecido</b> .....	<b>41</b>
3.5.2.1 Propriedades Mecânicas.....	42
3.5.2.2 Absorção de Água e Densidade de Massa.....	45
3.5.2.3 Microestruturas.....	46
3.5.3.4 Retração.....	47
3.5.3.5 Resistência à Aderência em Revestimentos.....	48
<b>4 PROGRAMA EXPERIMENTAL</b> .....	<b>49</b>
4.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	49
<b>4.1.1 Fatores Fixos de Controle</b> .....	<b>49</b>
<b>4.4.2 Fatores Variáveis de Controle</b> .....	<b>49</b>

<b>4.1.3 Fatores Não Controláveis</b> .....	<b>49</b>
<b>4.1.4 Variáveis de Resposta</b> .....	<b>50</b>
4.2 MATERIAIS.....	50
<b>4.2.1 Resíduo</b> .....	<b>50</b>
4.2.1.1 Adequação Granulométrica do Resíduo.....	53
4.2.1.2 Distribuição Granulométrica .....	54
4.2.1.3 Composição Química .....	54
4.2.1.4 Área Superficial e Massa Específica .....	56
<b>4.2.2 Cimento</b> .....	<b>56</b>
<b>4.2.3 Cal</b> .....	<b>57</b>
<b>4.2.4 Agregado Miúdo</b> .....	<b>58</b>
<b>4.2.5 Blocos Cerâmicos</b> .....	<b>61</b>
4.3 PRODUÇÃO DAS ARGAMASSAS .....	61
4.4 ENSAIOS DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO E ENDURECIDO .....	62
<b>4.4.1 Caracterização no Estado Fresco</b> .....	<b>62</b>
<b>4.4.2 Caracterização no Estado Endurecido</b> .....	<b>63</b>
4.5 PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS EM FORMA DE REVESTIMENTO .....	64
4.6 EFEITOS DA NUCLEAÇÃO NAS ARGAMASSAS .....	66
<b>4.6.1 Avaliação da Nucleação a partir de diferenças de Temperatura</b> .....	<b>66</b>
<b>5 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b> .....	<b>68</b>
5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	68
<b>5.1.1 Resíduos de Rochas Ornamentais</b> .....	<b>68</b>
5.1.1.1 Granulometria .....	68
5.2 RESULTADO DA CARACTERIZAÇÃO DA ARGAMASSA NO ESTADO FRESCO	70
<b>5.2.1 Consistência</b> .....	<b>70</b>
<b>5.2.2 Densidade de Massa no Estado Fresco</b> .....	<b>72</b>
<b>5.2.3 Retenção de Água</b> .....	<b>73</b>
<b>5.2.4 Teor de Ar Incorporado</b> .....	<b>74</b>
5.3 RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DA ARGAMASSA NO ESTADO ENDURECIDO.....	75
<b>5.3.1 Densidade de Massa</b> .....	<b>75</b>
<b>5.3.2 Módulo de Elasticidade</b> .....	<b>78</b>
<b>5.3.3 Resistência à Compressão</b> .....	<b>80</b>
<b>5.3.4 Resistência à Tração</b> .....	<b>83</b>

<b>5.3.5 Variação Dimensional e Variação de Massa .....</b>	<b>87</b>
<b>5.3.6 Resistência de Aderência à Tração .....</b>	<b>92</b>
<b>5.3.7 Calorimetria .....</b>	<b>95</b>
<b>5.3.7 Absorção de Água por Imersão e Índice de Vazios .....</b>	<b>97</b>
<b>5.3.8 Absorção de Água por Capilaridade e Coeficiente de Capilaridade .....</b>	<b>99</b>
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>102</b>
<b>6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>104</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>105</b>
<b>APÊNDICE A - RESULTADOS DAS PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO ..</b>	<b>118</b>
<b>    APÊNDICE B - RESULTADOS DAS PROPRIEDADES NO ESTADO</b>	
<b>    ENDURECIDO .....</b>	<b>120</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o setor da construção civil tornou-se o maior consumidor de recursos naturais (SANTOS, 2008). Na construção civil, a cada metro quadrado consome-se em cerca de uma tonelada de material. (DONATO *et al.*, 2017). Dessa forma, além de consumir muita matéria-prima, são geradas grandes quantidades de resíduos sem reaproveitamento. Ao reutilizar-se os resíduos provenientes de rochas ornamentarias em matrizes cimentícias, tanto o destino dos resíduos quanto a redução de dióxido de carbono gerada na produção de cimento melhorariam simultaneamente. (SINGH; SRIVASTAVA; BHUNIA, 2017).

Os resíduos provenientes do beneficiamento de rochas ornamentais são classificados como fíleres, devido a não possuírem atividade pozolânica. Possuem uma granulometria bem diversificada, podendo ter partículas acima de 100  $\mu\text{m}$  e partículas próximas a 1  $\mu\text{m}$ . Contudo, 50% das partículas são menores que 12,11  $\mu\text{m}$ , o que faz com que os resíduos possuam uma granulometria bem próxima ao do cimento. (ALVES, 2008).

Os fíleres podem atuar em diferentes funções devido ao diâmetro de suas partículas. Em diâmetros maiores, entre 50 a 150  $\mu\text{m}$ , agem preenchendo os vazios entre os agregados miúdos; e quando possuem diâmetros inferiores a 50  $\mu\text{m}$ , atuam no preenchimento de vazios deixados pela hidratação do cimento. (GONÇALVES, 2000).

Estudos apontam para o reaproveitamento dos resíduos de rochas ornamentais sob forma de coproduto em várias áreas e aplicações, como: concreto, argamassa, tijolos cerâmicos, outras áreas. Quando utilizado em concreto, traz às matrizes diversos benefícios, aumentando a resistência à compressão e à tração. Em argamassa de revestimento e assentamento, há uma redução no índice de vazios e na absorção de água. Ao utilizar a mesma em tijolos cerâmicos, gera-se uma diminuição na resistência mecânica, e favorece-se a matriz a ter uma menor condução térmica. (GONÇALVES, 2000; SALES; SÁ; SANTOS, 2014; SUTCU *et al.*, 2015).

Quando substituído o cimento pelo resíduo em até 10%, melhora-se a trabalhabilidade das argamassas; contudo, em substituições maiores que 10%, há a necessidade de mais água para conseguir a trabalhabilidade desejada. (VARDHAN *et al.*, 2015). Para as propriedades mecânicas, a substituição até 10% não altera de forma significava a resistência à compressão; todavia, em teores maiores que 10%,

há uma diminuição das resistências mecânicas. (SINGH; SRIVASTAVA; BHUNIA, 2017; VARDHAN *et al.*, 2015). Em contrapartida, outros pesquisadores como Nobrega *et al.* (2014) indicam que o melhor percentual foi em substituições maiores que 10%.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

O aumento do consumo de materiais devido ao crescimento da indústria da lavra e beneficiamento de rochas ornamentais leva à escassez de recursos naturais, levando à geração de grande quantidade de resíduos, o que afeta negativamente o meio ambiente. A ausência de medidas preventivas para minimizar esse efeito implicará em uma ameaça à saúde ambiental. (TUNC, 2019).

Ao reutilizar-se resíduos minerais, podem-se gerar diversas modificações em uma matriz cimentícia, devido a diversos fatores, como a granulometria e a composição mineralógica. Em geral, os resíduos providentes de rochas ornamentais não apresentam atividade química; eles apenas atuam através do efeito físico, contribuindo para um melhor empacotamento granulométrico e refinamento dos poros, preenchendo os vazios deixados pelos grãos de cimento; devido à sua granulometria, contribuem provocando uma maior dispersão e aceleração dos produtos hidratados, atuando como pontos de nucleação e acarretando ganho nas propriedades mecânicas. (GONÇALVES, 2000).

Ao comparar distribuição granulométrica dos resíduos de beneficiamento de rochas ornamentais e do cimento CP-V-ARI, Dietrich, Teles e Vieira (2017) obteve os seguintes resultados a partir da granulometria a laser: o diâmetro das partículas dos resíduos de rochas ornamentais na D10<sup>1</sup> está na ordem de 1,7 µm, D50 na ordem 11 µm e D90 na ordem 40 µm. Enquanto isso, as partículas de cimento foram na D10 na ordem 1,1 µm, D50 na ordem 7,8, e na D90 na ordem 22,5 µm. Como verificado, os resíduos de rochas ornamentais possuem uma granulometria fina, e quando utilizados em argamassas, podem trazer diversas mudanças às propriedades no estado fresco e endurecido, aumentando a resistência à compressão, à tração e à aderência em revestimento devido ao resíduo favorecer uma melhor ancoragem da argamassa ao substrato. (ARUNTAS *et al.*, 2010; SILVA, 2017; SINGH; SRIVASTAVA; BHUNIA, 2017). Ao mesmo tempo, a utilização pode ocasionar mudanças na trabalhabilidade

---

<sup>1</sup> D10, D50 e D90 correspondem, respectivamente, aos valores obtidos em análise de granulometria a laser; D10 é a peneira na qual existe 10% de material retido.

da argamassa, na retenção de água e diminuir a porosidade da matriz. (MATTA *et al.*, 2013; SANTOS; APOLINÁRIO; RIBEIRO, 2013; SINGH; SRIVASTAVA; BHUNIA, 2017).

Diversos autores (BUYUKSAGIS; UYGUNOGLU; TATAR, 2017; MIRANDA, 2007; NOBREGA *et al.*, 2014; SALES; SÁ; SANTOS, 2014; SANTOS; APOLINÁRIO; RIBEIRO, 2013) utilizam resíduos provenientes de rochas ornamentais em diferentes áreas: concreto, argamassa, tijolos solo-cimento etc. Os autores (KABEER e VYAS, 2018; SILVA, 2017; SINGH; SRIVASTAVA; BHUNIA, 2017;), em sua maioria, utilizam o resíduo na forma natural, apenas separando-o em peneiras para obter uma granulometria abaixo de 50  $\mu\text{m}$ .

No presente trabalho foram estudadas as alterações da substituição de cimento por resíduos de rochas ornamentais nas propriedades de argamassas de revestimento. Desta forma, além de colaborar com a busca de soluções para o reaproveitamento dos resíduos de rochas ornamentais, colabora-se tecnicamente, estudando as possíveis mudanças nas propriedades que diferentes teores de substituições de cimento podem trazer à argamassa de revestimento.

### 1.3 OBJETIVOS

Neste item estão contidos o objetivo geral e os objetivos específicos do presente trabalho.

#### 1.3.1 Objetivo Geral

Avaliar a viabilidade técnica do uso de resíduos de rochas ornamentais como matéria prima substituta ao ligante em argamassas de revestimento.

#### 1.4.2 Objetivos Específicos

- a) determinar a influência do teor de substituição de cimento por resíduos de rochas ornamentais nas propriedades das argamassas de revestimento no estado fresco e no estado endurecido;

- b) avaliar se os resíduos de rochas ornamentais atuam de forma ativa, a partir da análise cinética de hidratação através da calorimetria semi-adiabática em argamassas com diferentes teores de substituições;
- c) avaliar a influência da substituição de cimento por resíduo de rochas ornamentais na aderência da argamassa de revestimento.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A região da Mesopotâmia foi a pioneira no uso de rochas ornamentais; as mesmas eram usadas para fabricação de elementos estéticos, devido ao fato das rochas proporcionarem tonalidade e colorações vivas. (ALENCAR, 2013).

Até o início do século XIX, a extração de rochas ornamentais ainda era bem rudimentar, pois não existia nenhum processo de mecanização. Contudo, no final do século XIX, na Europa, houve os primeiros processos para a mecanização e beneficiamento da extração de rochas ornamentarias. O primeiro processo de extração foi através do fio helicoidal, que depois foi modernizado para os teares. (ALENCAR, 2013).

As primeiras indústrias de rochas ornamentais em território brasileiro utilizavam padrões europeus, que foram trazidos por imigrantes italianos e portugueses. Cabe salientar que na época exista pouco desenvolvimento tecnológico e os métodos utilizados eram rudimentares. Contudo, foi na Primeira Guerra Mundial, devido ao bloqueio marítimo imposto pela guerra, que houve a necessidade de o Brasil começar a produzir as próprias rochas ornamentais. O primeiro modelo de tear foi importado, e através desse começou-se a construção dos próprios teares nacionais. (SILVA, 2013).

O Brasil está entre os maiores produtores de rochas ornamentais, ficando na quarta posição mundial, apenas perdendo para a China, Índia e a Turquia. (CHIODI FILHO, 2018; GENCEL *et al.*, 2012). O Brasil, no ano de 2019, somou uma exportação de rochas ornamentais de US\$ 223,2 milhões e 451.573,4 t no primeiro trimestre de 2019, sendo que 79,3% foi de rochas processadas. (CHIODI FILHO, 2019).

Estudos realizados em 2002 para o Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações constataram a presença de 18 polos produtivos voltados para a produção de rochas ornamentais e revestimentos no Brasil, compostos por 10 estados e 80 municípios da federação envolvidos com a extração. Através dos registros, foram encontrados 370 municípios que recebem pela exploração de recursos minerais no Brasil. Os maiores produtores brasileiros encontram-se na região sudeste, contudo a região nordeste destaca-se na extração de rochas exóticas e calcários maciços, bem como na produção e beneficiamento de rochas ornamentais. (CHIODI FILHO, 2018).

As atividades para o setor de rochas ornamentais no Brasil, tanto no mercado interno como no externo, incluindo serviços, comercialização das máquinas, equipamentos e insumos, movimentou em torno de US\$ 5,0 bilhões em 2017. Atualmente, existem por volta de 10.000 empresas, sendo que em torno de 400 são exportadoras regulares e empregam 120 mil trabalhadores diretamente e 360 mil indiretamente. A maior parte das empresas são as marmorarias, chegando a mais de 60%, onde são divididas em micro e pequenas empresas, atuando no setor como as maiores responsáveis por empregar pessoas. (CHIODI FILHO, 2018).

## 2.1 ROCHAS ORNAMENTAIS

O termo “rochas ornamentais” relaciona-se com as rochas que depois de extraídas podem ser transformadas em blocos ou placas, cortadas em formatos diversificados e suas faces podem ser beneficiadas através de máquinas. (esquadrejamento, polimento, apicoamento e flameamento). Estão contidas nesses grupos as seguintes rochas: mármore, travertinos, granitos, ardósias, quartzitos, basaltos e outras. (CUNHA; ANDRADE; SOUZA, 2003; MARGUERON e MELLO, 2005).

Segundo Chiodi Filho (2018), as rochas ornamentais são classificadas em três grupos litológicos composicionais:

- a) rochas carbonáticas: incluem as rochas sedimentares ou metamórficas de origem sedimentar, formadas por calcita, dolomita e outros carbonatos. Incluem o mármore, travertino, limestone, ônix e o alabastro;
- b) rochas silicáticas: incluem as rochas ígneas ou metamórficas com origem ígnea, como ardósia, granito, mármore verde (serpentinóis), pedra-sabão e pedra-talco;
- c) rochas silicosas: incluem rochas sedimentares ou metamórficas de origem sedimentar, são formadas de quartzo ou sílica amorfa. São elas quartzito, metaconglomerado e quartzo.

Conforme Alencar (2013), a cadeia produtiva das rochas ornamentais é dividida em três etapas: extração, beneficiamento primário e beneficiamento final:

- a) extração: baseia-se na remoção do material útil dos maciços rochosos ou dos matacões. Retiram-se da extração, como produto, blocos retangulares com dimensões diversificadas. Os blocos são retirados de maneira para o máximo aproveitamento e utilização;
- b) beneficiamento primário: consiste na serragem ou desdobramento dos blocos. Nesse processo, os blocos são cortados em formato de chapas ou tiras. Esta etapa ocorre dentro da industrial, onde são utilizados máquinas e equipamentos para os desdobramentos dos blocos. Entre os tipos de máquinas e equipamentos estão: teares convencionais ou multifios diamantados, talha-blocos e monofios diamantado;
- c) beneficiamento final: nessa etapa, as chapas dos blocos têm suas formas, dimensões e aparências definidas. Esta etapa pode ser dividida em três processos: o polimento, o corte e o acabamento final. Para esses processos, é usado um maior número de máquinas e equipamentos. Os principais produtos que são retirados desta etapa são: soleiras, rodapés, ladrilhos, painéis etc.

O ciclo produtivo das rochas ornamentais está dividido em três etapas: a extração dos blocos, cortes dos blocos e o beneficiamento final. No entanto, na extração, antes das três etapas há uma etapa preliminar a tudo isso, e a mesma é denominada pesquisa mineral. Dessa forma, o ciclo produtivo chama-se *indústria da pedra*. (LISBOA, 2004; NOGAMI, 2013; SILVEIRA *et al.*, 2014).

As gerações de resíduos ocorrem desde a extração das rochas ornamentais, onde são deixadas grandes quantidades de resíduos para a obtenção de blocos com tamanhos ideais. Além da geração de resíduos, também são gerados impactos ambientais causados pelo desmatamento e problemas hidrológicos no local, conforme a figura 1. (LISBOA, 2004).

Figura 1 - Extração dos blocos e gerações de resíduos



Fonte: Alves (2008)

Após a extração, são feitos os cortes dos blocos para a transformação em chapas. Nessa etapa, há a geração da lama fluida (resíduo e água), onde é utilizada água para resfriar e evitar que as laminadas tenham oxidação, evitando, assim, que haja manchas nas chapas, conforme a figura 2. (CALMON *et al.*, 1997; LISBOA 2004).

Figura 2 - Corte dos blocos e resíduos gerados dos blocos.

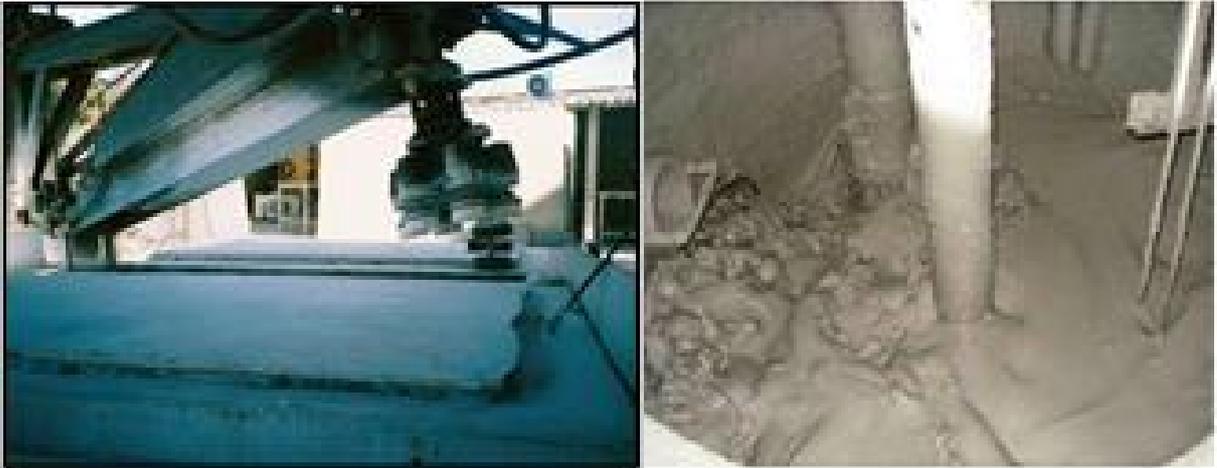


Fonte: Silva (2013) e Lisboa (2004)

Na última etapa do beneficiamento das rochas ornamentais para o processo de polimento e lustro das placas, são gerados diversos resíduos, contudo, em menor quantidade, como: lama fluida gerada pelo polimento, resinas e materiais derivados do desgaste das sapatas. Os resíduos de polimento são transportados por meio de canaletas de concreto, onde são depositados junto aos resíduos do corte dos blocos em tanques com água. Os maiores impactos ambientais desses resíduos são consequências do fato da lama fluida ser produzida em maior quantidade a cada dia

e ser depositada de forma incorreta em aterros sem prever o seu uso e, desta forma, contaminando e poluindo ecossistemas, conforme a figura 3. (GUPTA e VYAS, 2018; LISBOA, 2004; MAGACHO *et al.*, 2006; NUNES; FERREIRA; NEVES, 2004; SOARES, 2014).

Figura 3 - Polimento das chapas e resíduos gerados.

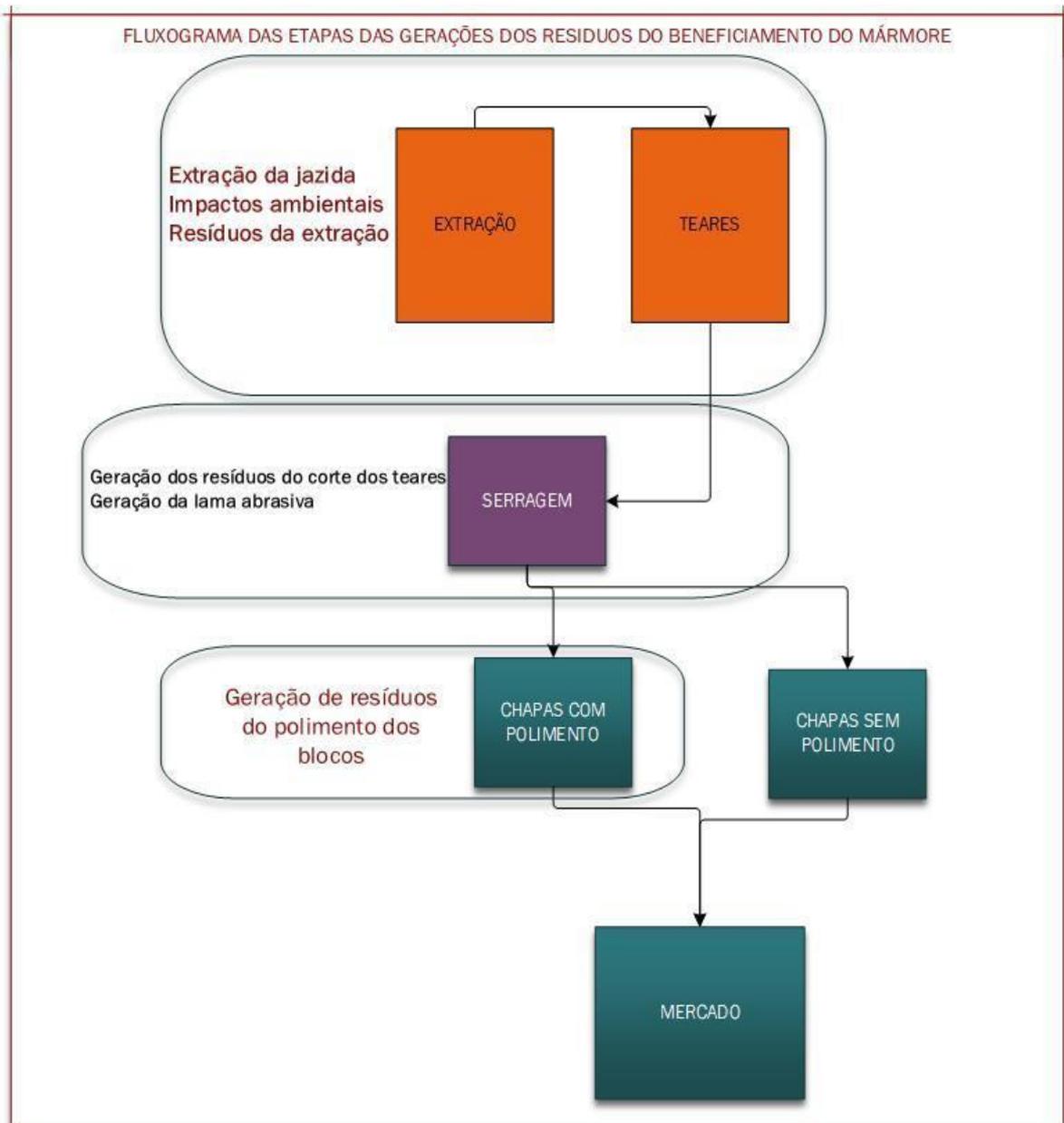


Fonte: Alves (2008) e Silva (2013)

No beneficiamento do mármore ou processo de serragem há perda dos blocos em 20 a 40%, onde são gerados resíduos em forma de lama. (ALYAMAC e INCE, 2009; ALYAMAC e TUGRUL, 2014; NEVES, 2002; RANA *et al.*, 2016; SABOYA JR; XAVIER; ALEXANDRE, 2007).

A figura 4 mostra o processo de beneficiamento de rochas ornamentais desde o processo extração até o mercado.

Figura 4 - Fluxograma das gerações dos resíduos



Fonte: Elaborada pelo autor.

### 2.1.1 Destinação de Resíduos de Rochas Ornamentais

São de suma importância os estudos de caracterização e reutilização dos resíduos de rochas ornamentais. Um exemplo típico sobre a reutilização de resíduos é o da escória de alto forno, pois, no passado, as indústrias siderúrgicas tinham

enormes problemas para a destinação final da escória. Porém, devido aos estudos sobre a reutilização do resíduo, a escória de alto forno tornou-se um subproduto da indústria cimentícia, valorizando a escória expressivamente. (ALVES, 2008).

Existem diversas aplicações para o reaproveitamento dos resíduos gerados pelo processo de beneficiamento de rochas ornamentais (lama fluida), principalmente na indústria cerâmica e na construção civil, como aplicações em cerâmica vermelha, cimento, argamassa e concreto. (AGUIAR, 2012).

Por ser tratado com um resíduo inerte, a principal aplicação do RBRO através das literaturas é para a produção de concreto. (BELAIDI *et al.*, 2012; DEMIREL, 2012; KORE e VYAS, 2016 ; RAI *et al.*, 2011; TENNICH; KALLEL; OUEZDOU, 2015; URAL; KARAKURT; COMERT, 2014). Os resíduos podem ser também aplicados na produção de concretos auto adensáveis. (KUMAYAMA *et al.*, 2014; LISBOA, 2004; UYSAL, 2012). Com uma menor frequência nas literaturas, os resíduos também podem ter aplicação em tijolos solo cimento e tijolos cerâmicos. (FRANÇA, 2017; MIRANDA, 2007; MUNIR *et al.*, 2018).

Outra aplicação frequente nas literaturas é em argamassa, tanto de revestimento como assentamento. Quando utilizadas em argamassa, aumentam as propriedades mecânicas e a resistência de aderência no substrato. (ARUNTAS *et al.*, 2010; SILVA, 2017; SINGH; SRIVASTAVA; BHUNIA, 2017; VARDHAN *et al.*, 2015;). A maior parte dos autores utilizaram os resíduos provenientes das serrarias de rochas ornamentais, onde são obtidos os resíduos do processo de polimento e do corte das chapas sob a forma de lama densa com partículas bastante reduzidas. Depois de secos, tornam-se um pó com tonalidade cinza. (ALVES, 2008; MATTA *et al.*, 2013; NOBREGA *et al.*, 2014).

### **2.1.2 Impactos Ambientais**

De acordo com Oliveira (2015), as atividades de extração e transformação mineral produzem volume de resíduos e grau de toxicidade variados. Desta forma, essas atividades de produção mineral têm como desafio a estocagem, o descarte ou o aproveitamento desses materiais.

Segundo Castro *et al.* (2011), os principais impactos gerados na produção de rochas ornamentais são devidos à grande quantidade de resíduos gerados. Nas pedreiras, a taxa de aproveitamento das rochas ornamentais é em torno de 30%.

Desta forma, há um grande volume de rejeitos grossos nas lavras; no beneficiamento das rochas ornamentais, os resíduos são finos, pois são provenientes das serragens dos blocos e polimento das chapas.

Estimasse que no Brasil haja uma produção de mais de 5 milhões de toneladas/ano de resíduos grossos e 300.000 toneladas/ano em resíduos finos. (CATTABRIGA, 2010 apud CASTRO *et al.*, 2011).

A grande geração de resíduos provenientes da extração de mármore causa grandes impactos ambientais ao meio ambiente urbano, principalmente quando é relacionada a extrações rudimentares. Como as grandes mineradoras utilizam explosões para extração do mármore, há a ocorrência de problemas geomorfológicos, processos erosivos e mudanças na rede de drenagem local. Grande parte dos problemas ambientais são relacionados às dificuldades técnicas que o setor sofre. Desta forma, são causados problemas ambientais de contaminação atmosférica por pós e gases, contaminação de águas superficiais e aquíferos, destruição de habitats e coberturas vegetais, alterações ecológicas, deslizamentos e processos erosivos. (SÁNCHEZ, 2002 apud BANDEIRA, 2017).

Os impactos ambientais começam desde a extração dos blocos nas lavras, pois são necessários o desmatamento e a remoção do solo para começar-se a operação de lavra, o que afeta negativamente a fauna e flora local. Logo após, são gerados os impactos ambientais no processo de beneficiamento. Os locais onde é armazenada a lama proveniente da serragem contamina o solo, altera as condições naturais do subsolo e do lençol freático. E o último impacto gerado é no beneficiamento final (polimento), quando há um aumento de poluição atmosférica em decorrência dos menores diâmetros das partículas. (SOUSA, 2007).

Os resíduos de rochas ornamentais são classificados como resíduo classe II, conforme a NBR 10004 (ABNT, 2004). (GONÇALVEZ, 2000; LOPES, 2007; MANHÃES e HOLANDA, 2008).

A legislação Brasileira na área ambiental teve sua solidificação a partir da década de 70. No ano de 1986, começou a ser obrigatório o licenciamento ambiental para as atividades de mineração. Contudo, ainda não existia uma política nacional de resíduos sólidos no Brasil. Desta forma, foi difícil a aplicação da legislação ao setor. (REIS e ALVAREZ, 2007).

Hoje, a disposição dos resíduos provenientes do beneficiamento de rochas ornamentais está regulamentada pela IEMA, e as empresas devem construir leitos de

secagem impermeabilizados que evitem a contaminação do solo e do lençol freático; esses leitos podem ser construídos em áreas próprias ou comunitárias. (CASTRO *et al.*, 2011).

## 2.2 CARACTERÍSTICAS DOS RESÍDUOS DE ROCHAS ORNAMENTAIS

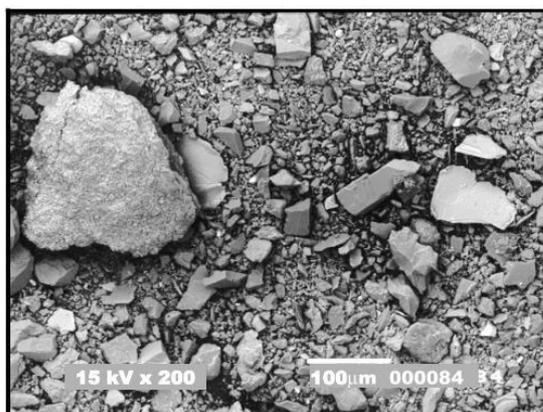
No presente item são apresentadas as principais características dos resíduos de rochas ornamentais relatadas segundo às literaturas.

### 2.2.1 Forma e Textura dos Grãos dos Resíduos do Beneficiamento de Rochas Ornamentais

Os resíduos de rochas ornamentais provenientes da lama fluida podem apresentar formas diversificadas, podendo ter uma forma lamelar, romboédrica e irregular. Quanto à textura, os resíduos provenientes de rochas ornamentais apresentaram uma textura áspera. (FONSECA, 2016; GONÇALVES, 2011; KABEER e VYAS, 2018; KHYALIYA; KABEER; VYAS, 2017).

Ao analisar as partículas provenientes de resíduos de rochas ornamentais através da microscopia eletrônica de varredura, Alves (2008) observa que, em sua maioria, as partículas possuem formas bastante irregulares. Como mostra a figura 5, as partículas não apresentam nenhuma tendência a ter formas cúbicas ou lamelares. As formas irregulares apresentadas pelas partículas, estão associadas ao desgaste e à quebra dos grãos minerais das rochas durante o polimento.

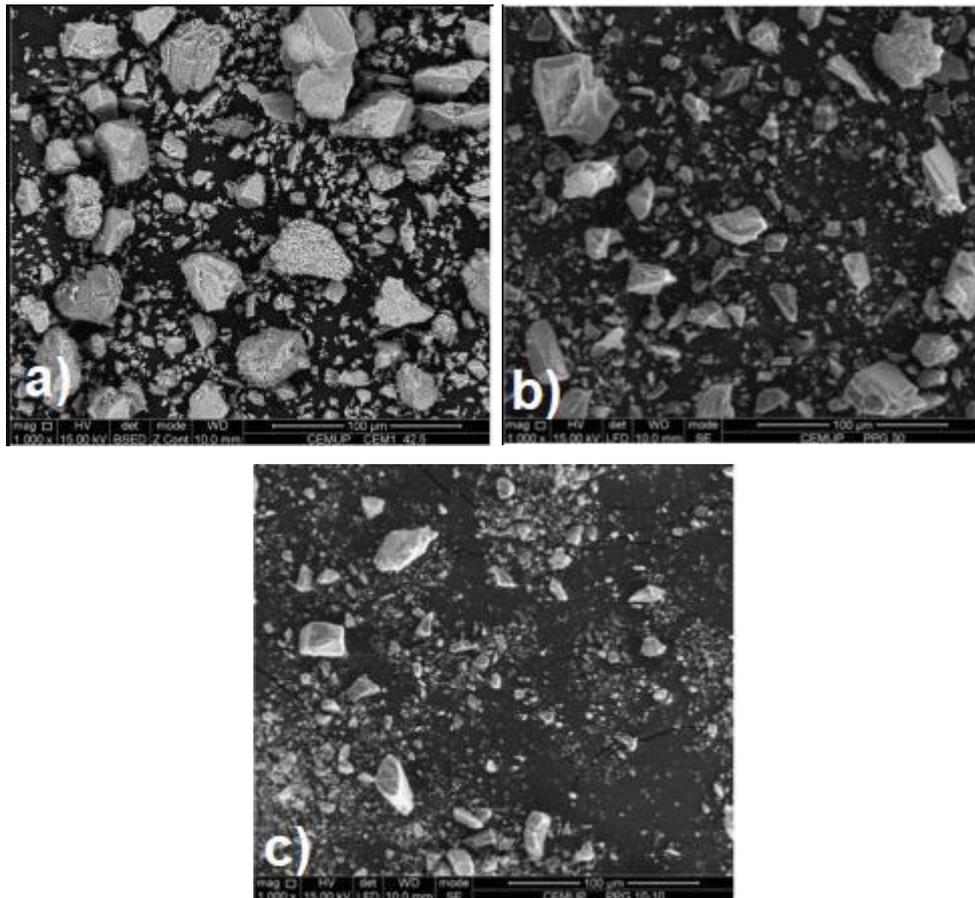
Figura 5 - Imagem de microscopia eletrônica de varredura de resíduos de rochas ornamentais



Fonte: Alves, 2008.

Conforme Ramos *et al.* (2013), as partículas de resíduos de granito são mais grosseiras do que as partículas de cimento, e apresentam formas mais angulares e prismáticas em comparação às partículas de cimento que são arredondadas, Conforme a figura 6.

Figura 6 - MEV de cimento (a), resíduos de rochas ornamentais sem processo de moagem (b) resíduos de rochas ornamentais moídos (c).



Fonte : Ramos *et al.* (2013)

A forma e a textura das partículas dos resíduos modificam as propriedades das argamassas no estado fresco. A forma das partículas influencia trabalhabilidade, devido ao ângulo de atrito interno provocado pelas partículas, modificando a quantidade de água de amassamento. A textura interfere diretamente nas propriedades de uma matriz cimentícia, pois partículas com texturas ásperas tendem a necessitar de mais pasta de cimento para conseguir uma mistura trabalhável. Desta forma, quanto menor a rugosidade das partículas e maior o grau de esfericidade e arredondamento, menor será a demanda de água de amassamento e de

aglomerantes na argamassa. (GONÇALVES, 2000; MEHTA e MONTEIRO, 2014; TRISTÃO, 2005).

### 2.2.2 Distribuição Granulométrica

Quando submetida a um simples processo de secagem ao sol, e através de peneiras (4,75 mm a 150  $\mu$ m), os resíduos de rochas ornamentais na forma natural apresentaram uma granulometria bastante fina, tendo 90% das partículas menores do que 75  $\mu$ m e 50% das partículas menores do que 49,68  $\mu$ m, mostrando, desta forma que os resíduos possuem uma granulometria bem próxima ao do cimento. (KABEER e VYAS, 2018; SILVA, 2017). Contudo, através do processo de moagem, como o moinho de bolas, o resíduo obteve uma granulometria bem mais alta, chegando a ter diâmetros médios na faixa de 7 a 19  $\mu$ m. (LOPES, 2007).

A tabela 1 mostra os métodos de separação que diversos autores utilizaram e as dimensões dos resíduos.

Tabela 1 - Métodos de separação de resíduos de rochas ornamentais

Autor	Método de separação	Tipo dos resíduos	Dimensões do resíduo
SILVA (2017)	Peneirados nas peneiras de 4,75 mm a 150 $\mu$ m em agitação mecânica.	Lama	90% do material utilizado no ensaio teve partículas menores do que 75 $\mu$ m.
KABEER e VYAS, (2018)	Peneira de 1,18mm	Lama	50% das partículas do resíduo eram menores do que 49,68 $\mu$ m.
SINGH; SRIVASTAVA; BHUNIA (2017)	Peneira de 300 $\mu$ m	lama	60% dos resíduos passaram através da peneira de abertura de 300 $\mu$ m de diâmetro.
LOPES (2007)	Moído em um moinho de bolas	lama	diâmetro na faixa de 7 a 19 $\mu$ m.
LI <i>et al.</i> (2019b)	Peneira de 0,15 mm	lama.	Cerca de 5% da massa do resíduo fornecido foi maior que 0,15 mm.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Ao analisar os resíduos provenientes de uma rocha ornamental (granito), Alves (2008) verifica que o resíduo possui uma granulometria diversificada, pois existem grãos com diâmetros acima de 100  $\mu\text{m}$  e grãos com dimensões próximas a 1  $\mu\text{m}$ . Conforme o autor, essa diferença de granulometria pode estar associada ao desgaste e quebra dos grãos durante o processo de beneficiamento.

Ao analisar os resíduos provenientes de rochas ornamentais, conforme a tabela 2, e através da análise de granulometria a laser, é possível observar que os resíduos de rochas ornamentais em geral têm granulometria semelhante à do cimento.

Tabela 2 - Difração a laser de cimento e resíduos de rochas ornamentais.

Material	D10% (Diâmetro $\mu\text{m}$ )	D50 % (Diâmetro $\mu\text{m}$ )	D90 % (Diâmetro $\mu\text{m}$ )
Cimento CP-V-ARI (DIETRICH; TELES; VIEIRA, 2017)	1,1	7,8	22,5
Cimento CP-II-F-32 (HANSEN,2016)	4,66	15,98	41,60
Cimento CP-III (OLIVEIRA <i>et al.</i> , 2012)	2,38	20,71	49,37
Resíduos de granito (ALVES,2008)	1,81	12,11	39,17
Resíduos de granito ao natural (RAMOS <i>et al.</i> ,2013)	1,55	13,05	55,46
Resíduos de granito moído (RAMOS <i>et al.</i> ,2013)	0,84	3,48	13,34
Resíduos de granito (LIMA; LIRA; NEVES, 2016)	2,5	22,38	60,43
Resíduos do beneficiamento de rochas ornamentais (DIETRICH; TELES; VIEIRA, 2017)	1,7	11	40

Fonte: Elaborada pelo autor

### 2.2.3 Composição Química dos Resíduos

Devido ao fato de as rochas ornamentais serem formadas por dois grupos: rochas carbonáticas (mármore, dolomitos) e rochas silicáticas (granitos, sienitos, arenitos e dioritos), sua composição química pode ser bem diversificada. (SOSSAI, 2006).

A tabela 3 mostra a composição química das principais rochas ornamentais (mármore e granito) citadas nas literaturas. Foram colocados os principais elementos químicos em comum. Como alguns elementos químicos presentes individualmente, como LI, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, CL e outros, não foram colocados, a tabela não fecha 100%.

Tabela 3 - Composição química dos resíduos de rochas ornamentais

Tipo de rochas	Pesquisadores	SO <sub>3</sub> %	MgO %	CaO %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	SiO <sub>2</sub> %	Perda ao fogo
Mármore	ALIABDO; ELMOATY; AUDA (2014)	0,56	0,52	83,22	0,05	0,73	1,12	2,5
	RODRIGUES; BRITO; SARDINHA (2015)	< 0,1	0,64	54,2	0,14	0,32	1,39	42,60
	UYSAL E SUMER (2011)	-	0,23	55,49	0,12	0,29	0,7	42,83
	UYSAL E YILMAZ (2011)	-	0,23	55,49	0,12	0,29	0,7	42,83
	HEBHOUB <i>et al.</i> (2011)	-	1,03	54,86	0,04	0,08	0,15	44,26
Granito	MASHALY, SHALABY e RASHWAN (2018)	0,39	0,36	3,27	13,35	11,96	58,17	2,58
	GUPTA E VYAS. (2018)	-	0,38	0,41	0,86	13,4	74,39	-
	RAMOS <i>et al.</i> (2013)	-	1,82	3,26	4,47	15,66	63,22	2,04
	MEDINA <i>et al.</i> (2017)	-	1,60	2,36	2,52	14,99	69,60	0,52
	ABUKERSH e FAIRFIELD (2011).	0,05	1,70	3,69	3,66	16,3	61,4	5,01
	GONÇALVES (2000)	0,03	1,96	4,83	9,42	12,77	59,62	1,92
Resíduos contendo mármore e granito.	BACARJI <i>et al.</i> (2013) Empresa (1)	0,04	2,96	6,13	7,59	11,26	58,67	5,99
	BACARJI <i>et al.</i> (2013) Empresa (2)	0,02	3,22	12,99	5,86	9,70	54,62	9,57
	BACARJI <i>et al.</i> (2013) Empresa (3)	0,02	1,72	11,27	7,26	10,28	54,10	7,84
	DIETRICH; TELES; VIEIRA (2017)	0,06	0,93	3,44	3,79	13,50	66,80	3,50
	MATTA <i>et al.</i> (2013)	-	8,21	17,70	4,89	9,04	37,60	17,29
	NOBREGA <i>et al.</i> (2014)	2,142	7,916	26,03 9	4,653	12,183	43,627	-

Fonte: Elaborada pelo autor

Através da análise química feita pelos diversos autores, é possível notar que existe uma grande diferença da composição química entre o granito e o mármore. Os resíduos de granito apresentam um maior teor de sílica, e os de mármore têm um maior teor de cálcio. A diferença presente entre os tipos de resíduos está na sua formação reológica, pois, enquanto o granito é uma rocha silicática, o mármore é uma rocha carbonática. Desta forma, ao utilizar os resíduos de rochas ornamentais, estarão contidos os resíduos provenientes das diversas rochas, assim a composição química do resíduo poderá ser bem diversa.

### 3 INFLUÊNCIA DOS RESÍDUOS DE ROCHAS ORNAMENTAIS EM ARGAMASSAS

A utilização de resíduos de rochas ornamentais em uma argamassa pode gerar três efeitos diferentes: efeito filer, efeito de nucleação e efeito de diluição.

#### 3.1 EFEITO FILER

Segundo Neville (2016) apud Pereira 2016, filer é um material de origem natural, que também pode ser obtido através de processos de moagem de minerais inorgânicos, tornando-se um material bastante fino, com uma granulometria próxima à do cimento Portland, e que através de suas propriedades físicas causa efeitos benéficos às propriedades de matrizes cimentícias. Influenciando a trabalhabilidade, massa específica, permeabilidade, capilaridade e exsudação.

Conforme Dal Molin (2005) apud Fonseca (2016), o filer é um material que não atua quimicamente, seu maior efeito é físico, atuando no empacotamento granulométrico e criando pontos para gerar a nucleação dos produtos hidratados dos grãos de cimento.

Como as partículas do filer são muito finas, as mesmas atuam preenchendo os espaços que são deixados entre as partículas de maior tamanho, levando à mudança na porosidade. (OLIVEIRA *et al.*, 2017).

Quando utilizado em argamassa, pode trazer diversos benefícios, como: aumento da resistência à compressão e à tração, aderência ao substrato e maior densidade fresca aparente. (KABEER e VYAS, 2018). Contudo, a substituição pode causar efeito negativo, aumentando a demanda de água para corrigir a trabalhabilidade, pois esse fator modifica diversas propriedades: retração, porosidade e propriedades mecânicas. (BONAVETTI e IRASSAR, 1994; KHYALIYA; KABEER; VYAS, 2017).

Conforme as literaturas, é possível notar que a adição de um filer em uma matriz pode trazer diversos benefícios, como: aumento na resistência à compressão e tração, efeitos físicos de fechamentos de poros, melhor desempenho reológico, criação de pontos de nucleação e melhor empacotamento entre os grãos. Todavia, ao utilizar um resíduo tão fino quanto o do cimento, é preciso ter alguns cuidados com a porcentagem que será incorporada.

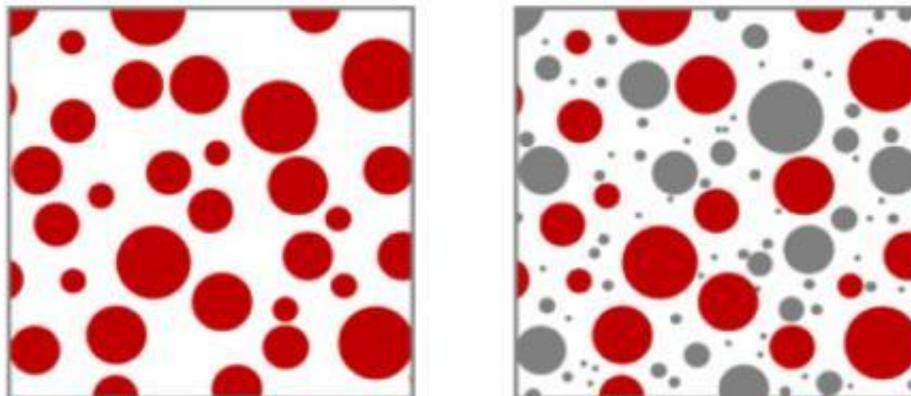
Uma das desvantagens notada ao adicionar o filer em uma matriz cimentícia é o aumento do teor de água, que pode diminuir a resistência à compressão e aumentar a retração e a porosidade. (BUYUKSAGIS; UYGUNOGLU; TATAR, 2017; SINGH; SRIVASTAVA; BHUNIA, 2017; VARDHAN *et al.*, 2015).

### 3.2 EFEITO DE NUCLEAÇÃO

Para ter o efeito de nucleação, as partículas de filer devem ser mais finas do que as partículas de clínquer, deixando a matriz com uma maior área de superfície para ocorrer a nucleação, melhorando a distribuição dos produtos hidratados. Como os mesmos foram uniformemente distribuídos na macroestrutura, utilizando de formas mais efetivas os grãos de cimento, gera-se um aumento na hidratação e no teor de  $C_3S$ , ocasionando, assim, um aumento na resistência à compressão nas primeiras idades. (CHOUDHARY; SHAN; BISHNOI, 2016; LOTHENBACH *et al.*, 2008; OUYANG *et al.*, 2017; SCHILLER *et al.*, 1992 apud PALM *et al.*, 2016; VIJAYALAKSHMI; SEKAR; PRABHU, 2013).

As partículas finas presentes no filer proporcionam à matriz um maior número de pontos para gerar nucleação, como mostra a figura 7, precipitando os hidratos sobre as superfícies dos grãos de filer. (HOPPE FILHO, 2008; RAHHAL e TALEDO, 2005).

Figura 7 - Efeito de nucleação

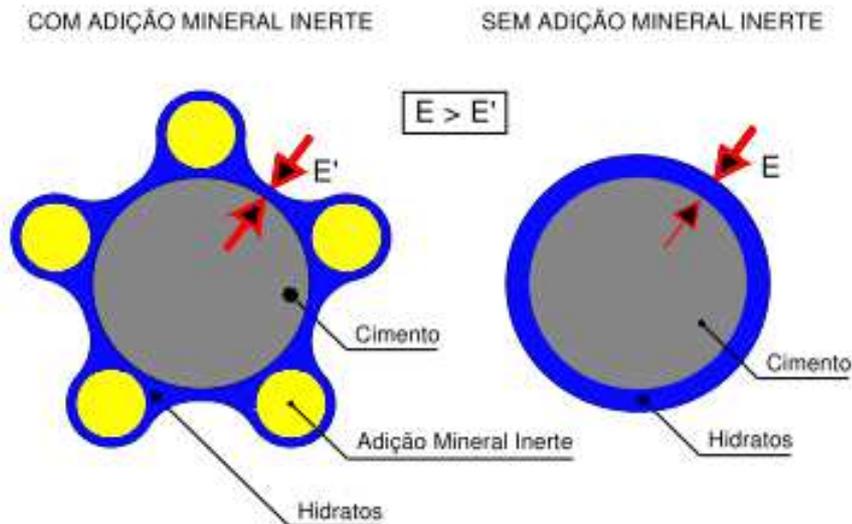


Fonte: John, Matschei e Stephan, (2018) adaptado de Scrivener, Juilland e Monteiro (2015)

Segundo Lawrence, Cry e Ringot (2003), há uma melhor maneira de explicar: a melhoria na hidratação do cimento ocorre quando é adicionado filer mineral, pois a camada que é formada em torno dos grãos de cimento é reduzida quando existe a

presença de pequenas partículas minerais. Isso faz com que a hidratação que ocorre no cimento anidro relacione-se ao fenômeno de difusão, facilitando a hidratação. Dessa forma, as partículas pequenas dos fíleres levam ao aumento da hidratação, como mostra a figura 8.

Figura 8 - Aumento da hidratação pelo efeito de nucleação

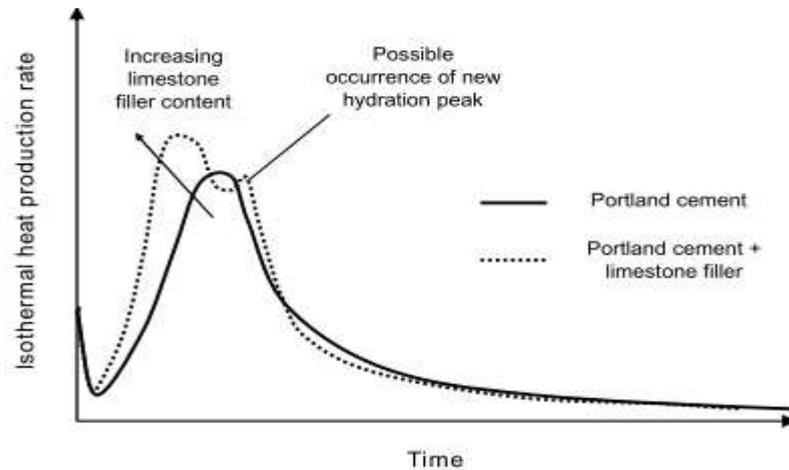


Fonte: Hoppe Filho (2008) adaptado de Lawrence, Cry e Ringot (2003).

O efeito de nucleação tem maior importância nas primeiras idades de hidratação na medida que a microestrutura está se desenvolvendo. Onde C-S-H precipita-se e constitui em torno de 60% da pasta de cimento totalmente hidratada, forma-se uma rede sólida dos grãos de cimento com o filer, gerando um aumento na resistência. (OUYANG *et al.*, 2017).

Schutter (2011) apud Oliveira *et al.* (2017) verifica o efeito da incorporação de filer calcário sobre a hidratação do cimento, através da taxa de produção de calor de hidratação em condições isotérmicas, conforme a figura 9.

Figura 9 - Produção de calor de hidratação em condições isotérmicas.



Fonte: Schutter (2011) apud Oliveira *et al.* (2017).

Conforme pode ser verificado na figura 9, a incorporação de filler calcário possibilita o efeito de nucleação, pois nas primeiras horas de hidratação o período de indução diminui e a hidratação aumenta em relação à referência com apenas cimento Portland puro. O aumento do segundo pico pode ser devido à diminuição da relação cimento/pó. Desta forma, quanto maior a quantidade de filler calcário, menor a quantidade de cimento Portland. Segundo Schutter (2011) apud Oliveira *et al.* (2017), além dos dois picos pode haver um terceiro pico de hidratação se ocorrer combinações entre o cimento Portland (rico em  $C_3A$ ) e o calcário.

### 3.3 EFEITOS DE DILUIÇÃO

Ao substituímos materiais ligantes, como Clínquer, escoria e pozolânas, por um material inerte (Filer), ocorre a diminuição da fração de volume sólido preenchida por produtos de hidratação, aumentando a porosidade e diminuindo a resistência da matriz. (JOHN *et al.*, 2018; WANG *et al.*, 2018).

Conforme Choudhary, Shan e Bishnoi (2016), em níveis altos de substituição, o efeito de diluição torna-se predominante, fazendo a resistência mecânica diminuir em comparação ao aumento da hidratação.

O efeito de diluição é devido à substituição parcial do cimento por algum tipo de mineral, e tem como consequência: aumentar a relação  $a/c$  e diminuir a resistência à compressão. Para poder verificar o efeito de diluição, o pesquisador utiliza um mineral quimicamente inerte com partículas de tamanho grande o suficiente para que

o efeito de nucleação não ocorra de forma significativa. (CYR; LAWRENCE; RINGOT, 2006).

A diluição pode ser equilibrada se a finura do clínquer for aumentada através de moagem, ou pela diminuição da relação a/c. (JOHN *et al.*, 2018). Contudo, ao diminuir-se a/c, favorece-se a diminuição da trabalhabilidade, portanto, é indicado o aumento do teor de filer quando existe um adequado empacotamento e dispersão das partículas. (JOHN *et al.*, 2018).

O efeito de diluição neutraliza os efeitos benéficos do filer e limita o seu uso, promovendo um menor volume de produtos hidratados e uma menor quantidade de água combinada com o cimento incorporado. Ao reduzir-se o volume de produtos hidratados nas primeiras idades em altos teores de filer, diminui-se a resistência à compressão. (IRASSAR *et al.*, 2015).

### 3.4 TEORES DE SUBSTITUIÇÃO

A tabela 4 representa os percentuais de substituições usuais, segundo as literaturas. Como o cimento em geral já possui um pequeno percentual de filer, o tipo de cimento foi citado na tabela.

Tabela 4 - Teores de substituições de cimento por resíduos de rochas ornamentais

Pesquisador	Tipo de cimento	Observação	Substituição (%)	melhores resultados	Objetivo do trabalho
VARDHAN <i>et al.</i> (2015)	O cimento Portland comum (OPC) 43.	Cimento indiano, que é fabricado com 95 a 97% de clínquer e 3 a 5% de gesso.	10%, 20%, 30%, 40%, 50%.	10%	"Investigar a possibilidade de utilização do pó de mármore como substituição parcial do cimento."
SINGH; SRIVASTAVA; BHUNIA (2017)	O cimento Portland comum (OPC) 43	Cimento indiano, que é fabricado com 95 a 97% de clínquer e 3 a 5% de gesso.	10% 15% 20% 25%	15%	"Efeitos da pasta de mármore no processo de hidratação, propriedades do concreto fresco e endurecido e propriedades de durabilidade."
ARUNTAS <i>et al.</i> (2010)	Cimento Portland comum CEM I e CEM II	CEM I (95% de clínquer e no máximo 5% de constituintes secundários). CEM II (com adição de calcário até 35%).	2,5%, 5%, 7,5% e 10%.	10%	Investigar a usabilidade do pó de mármore residual como um aditivo na produção de cimento composto e determinar suas propriedades de desempenho em função da adição de pó de mármore residual."

NOBREGA <i>et al.</i> (2014)	cimento CII-F 32	Cimento Portland composto com filer, com entorno de 90% de clínquer e até 10% de filer.	5%, 10%, 15%, 20%, 30%, 50%	15%	Avaliar a incorporação dos resíduos provenientes de rochas ornamentais em argamassas de revestimento, objetivando manter ou melhorar as propriedades das argamassas.
MATTA <i>et al.</i> (2013)	CP-II Z 32	Cimento composto de acordo a norma antiga, onde era presente 6- 14 material pozolânico e de 0 a 10% de calcário.	5% 10% 15%	10%	“Verificar o efeito da adição do resíduo de corte de mármore e granito nas principais propriedades das argamassas de cimento Portland no estado endurecido.”
SANTOS; APOLINÁRIO; RIBEIRO (2013)	CP-II Z 32	Cimento composto de acordo à norma antiga, onde era presente 6- 14 material pozolânico e de 0 a 10% de calcário.	5% 10% 15%	5%	“Avaliar a viabilidade técnica do uso do resíduo de corte de mármore e granito (RCMG) como adição a argamassas de cimento Portland, observando se sua adição pode comprometer seu comportamento reológico”
APOLINÁRIO (2014)	CP-II Z 32 RS	Cimento composto de acordo à norma antiga, onde era presente 6- 14 material pozolânico e de 0 a 10% de calcário.	5% 10% 15%	10%	“Avaliar o comportamento do resíduo de corte de mármore e granito quando adicionado às argamassas comuns de cimento Portland, mistas (cimento e cal) e industrializadas”

Fonte: Elaborada pelo autor.

A maioria dos autores estudados consegue resultados positivos com a substituição em pequenas porcentagens (em torno de 10 a 15% entre os cimentos trabalhados). A maior parte dos cimentos têm altos teores de clínquer, chegando a ter 95%. Percebe-se que se torna mais fácil enxergar os resultados que a substituição traz à matriz quando o cimento utilizado tem baixo teor de filer.

### 3.5 EFEITO DOS RESÍDUOS DE ROCHAS ORNAMENTAIS NAS PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS

Neste item são relatadas as principais influências quanto à utilização dos resíduos de rochas ornamentais nas propriedades de argamassa de revestimento.

### 3.5.1 No Estado Fresco

Conforme Vardhan *et al.* (2015) a substituição de até 10% do cimento por resíduos de rochas ornamentais torna a argamassa mais trabalhável, contudo, acima de 10% diminui a trabalhabilidade. Singh, Srivastava e Bhunia (2017) verificam que a substituição parcial do cimento por resíduos de mármore diminui a trabalhabilidade das pastas produzidas, pois, pôr o resíduo de rocha ornamental ter uma menor granulometria, a substituição necessita de maior quantidade de água para atingir a mesma trabalhabilidade.

Entretanto, Aruntas *et al.* (2010) relatam que, ao substituir o cimento pelo resíduo do mármore, a quantidade de água diminui, pois o resíduo tem uma menor área superficial do que cimento, e a substituição não afetou a consistência das argamassas.

Porém, Nobrega *et al.* (2014) verificam que, ao substituir o cimento por resíduos de rochas ornamentais nos teores (5%, 10%, 20% e 50%), todas as argamassas com os diferentes teores apresentaram uma consistência adequada aos valores normativos, devido a não haver uma variação significativa na trabalhabilidade. Segundo o autor, de acordo com o pedreiro experiente que utilizou as argamassas, à medida que o mesmo substitui o cimento pelo resíduo, ocorrem melhoras na trabalhabilidade e na aderência. Contudo, para conseguir a trabalhabilidade desejada Li *et al.* (2018), aumenta-se a demanda de superplastificante.

Ao analisar densidade aparente da argamassa no estado fresco, Santos, Apolinário e Ribeiro (2013) observam que a densidade aumenta com o teor de substituição dos resíduos de rochas ornamentais, pois o resíduo possui uma granulometria fina, ocupa os espaços vazios na argamassa, refina os poros e melhora o empacotamento. Ao analisar o ar incorporado das argamassas no estado fresco, o autor verifica que há pouca variação das argamassas com diferentes teores de substituição.

### 3.5.2. No Estado Endurecido

No presente item é retratada a influência da utilização de resíduos de rochas ornamentais nas propriedades de uma argamassa de revestimento no estado endurecido.

### 3.5.2.1 Propriedades Mecânicas

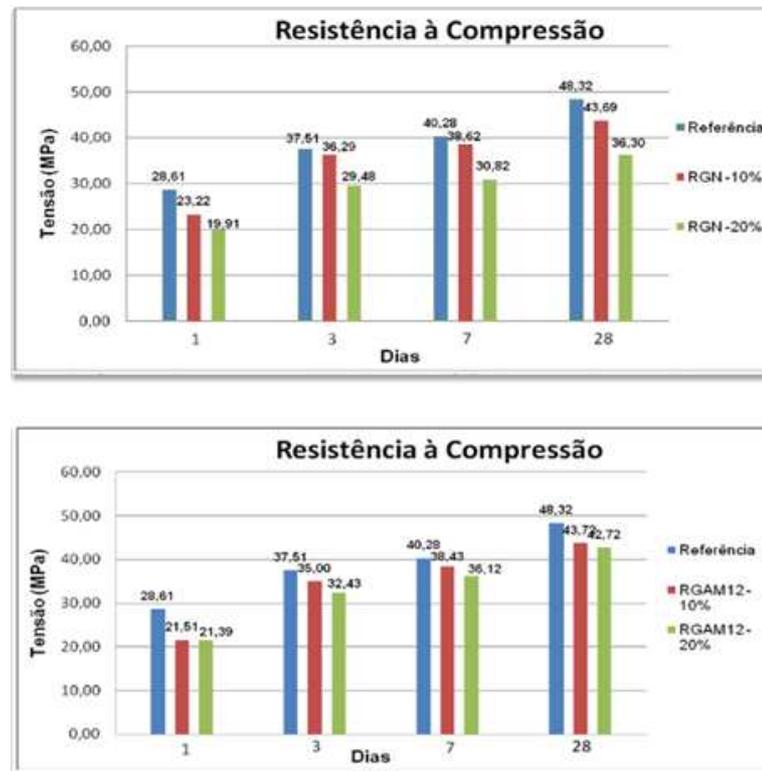
Quando substituído o cimento por resíduos de rochas ornamentais, (SINGH; SRIVASTAVA; BHUNIA, 2017; VARDHAN *et al.*, 2015) verificam que a substituição de até 10% aumenta a resistência à compressão em torno de 5% em relação à referência, e que o resíduo atua no preenchimento dos poros da argamassa e não desempenha um papel importante no processo de hidratação. Contudo, em teores mais altos que 10%, a resistência tende a diminuir acima de 10%, em relação à referência, como também a quantidade de C<sub>3</sub>A e C<sub>2</sub>S, que são fundamentais para o processo de hidratação.

Ao comparar argamassas com cimento Portland comum com substituição parcial de cimento por resíduos de mármore e argamassas com cimento pozolânico sem adição, Aruntas *et al.* (2010) verificam que em todas as idades (7,28 e 90 dias) as argamassas comuns com substituições (2,5% a 10%) de resíduos de mármore apresentam resistências maiores à compressão e à tração (em torno de 7 a 30%).

Mashaly, Shalaby e Rashwan (2018) verificam que ao, substituir até 20% do cimento por resíduos de granito em argamassa, há uma leve redução da resistência à compressão em torno de 7,65% em relação à referência, contudo, em teores entre 30 a 40% a redução foi mais significativa (em torno de 19 a 31%).

Oliveira *et al.* (2011) analisaram a resistência à compressão das argamassas em diferentes níveis de substituição e granulometria, substituindo o cimento por resíduos de granito. Os autores verificaram que, tanto na forma natural como moído, foi diminuída a resistência à compressão em todas os teores e idades em relação à referência, sem nenhum teor de resíduo de granito. Contudo, quando moídos, os resíduos de granito apresentam melhores resultados que os resíduos na forma natural da argamassa, conforme mostra a figura 10.

Figura 10 - Resistência à compressão de argamassa com resíduos de granito natural e moídos por 12 horas (RGAM12)

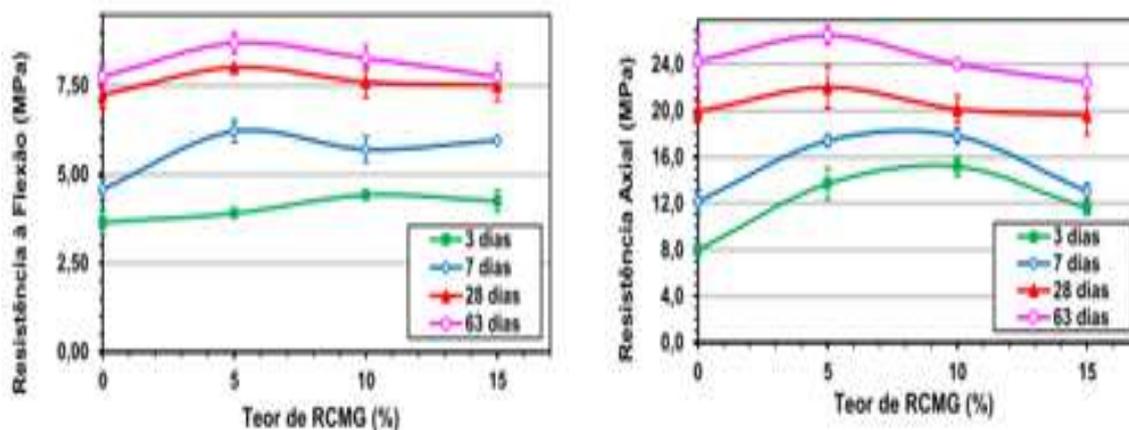


Fonte: Oliveira *et al.* (2011)

Matta *et al.* (2013), ao verificarem a evolução da resistência à flexão nas idades (3,7,28 e 63 dias), observam que as resistências médias das argamassas que têm resíduos de mármore e granito com teor de 5% aumentam em relação à referência sem nenhuma substituição em 12,1%. Desta forma, o contrário é relatado por Gonçalves (2000), que verifica que pequenos teores de substituição não alteram a resistência na flexão das argamassas.

Matta *et al.* (2013) constata resultados semelhantes entre a resistência axial e a resistência à compressão à tração, pois há um aumento de resistência em todas as idades em baixos teores de substituição, conforme mostra a figura 11. Pelo fato de o resíduo possuir partículas finas e ser inerte, o mesmo atua preenchendo os espaços vazios e aumentando a densidade, a compacidade e a resistência. A diminuição da resistência em altos teores de substituição pode ser devida à formação de aglomerações de partículas de resíduo, retendo parte da água de amassamento, modificando a reologia da pasta e reduzindo a quantidade de água para as reações de hidratação do cimento.

Figura 11 - Resistência à flexão e axial



Fonte: Matta *et al.* (2013)

Conforme Matta *et al.* (2013), quanto mais densa for a matriz, maior é a velocidade da propagação de onda ultrassônica, e superior é o módulo de elasticidade. O módulo de elasticidade é um parâmetro fundamental nas argamassas de revestimento, pois o surgimento de possíveis fissuras é associado ao elevado módulo de elasticidade e da baixa resistência à tração.

Os resultados obtidos por (MATTA *et al.*, (2013); SILVA (2017)) demonstram que o aumento do teor de finos nas argamassas aumenta a compacidade do conjunto ligante/agregado, aumentando o empacotamento entre os grãos, diminuindo a porosidade e aumentando a rigidez da argamassa, aumentando, assim, a velocidade de propagação da onda ultrassônica.

Para Apolinário (2014), o resíduo de rochas ornamentais é considerado um filer que possui uma granulometria bastante fina e atua no efeito físico de tamponamento dos poros e de complemento granulométrico, agindo como ponto de nucleação para o aumento da resistência mecânica e módulo de elasticidade.

Ao analisar a substituição de 10% do cimento por resíduo de rocha ornamental, (SINGH; SRIVASTAVA; BHUNIA, (2017); TENÓRIO; LAMEIRAS; LIMA, (2005)) observam um pequeno aumento no módulo de elasticidade e, desta forma, concluem que o resíduo atua como filer na argamassa.

Entretanto, Nobrega *et al.* (2014) observam que, ao substituir o cimento por resíduo de rochas ornamentais, há uma diminuição gradual do módulo de elasticidade com o aumento do teor de substituição. Todavia, ao diminuir o módulo, a capacidade

da argamassa a resistir a tensões quando submetidas tende aumentar, diminuindo possíveis fissurações ao longo da superfície.

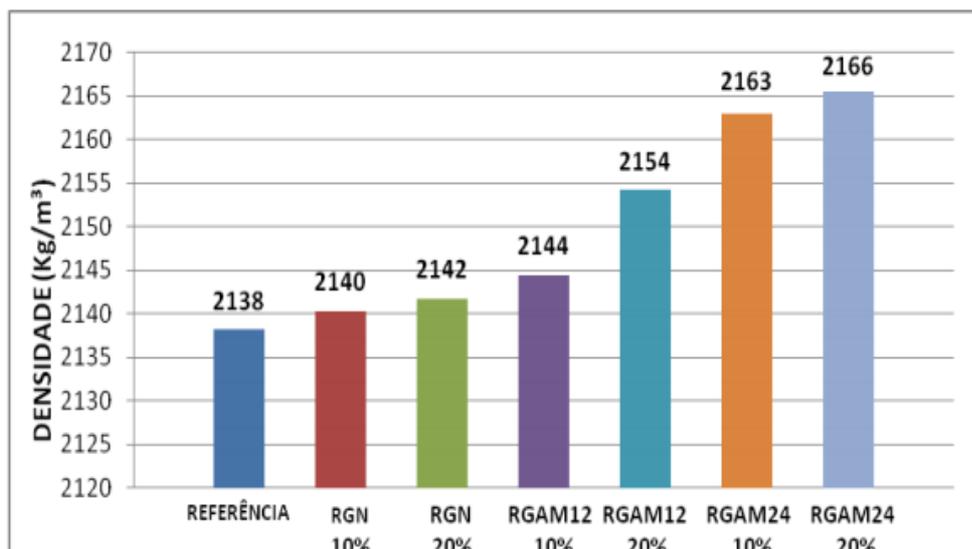
### 3.5.2.2 Absorção de Água e Densidade de Massa

Conforme Matta *et al.* (2013), ao substituírem 5% de cimento por resíduos de rochas ornamentais, não há mudanças significativas na absorção de água por capilaridade, contudo, o aumento foi significativo em teores maiores do que 5%. Resultados semelhantes foram encontrados por Santos, Apolinário e Ribeiro (2013), que observam que o baixo teor de substituição não gera aumento significativo de retenção de água. Já Nobrega *et al.* (2014) verificam o aumento da absorção de água após substituir 20% do cimento por resíduos de rochas ornamentais.

Ao verificar a absorção de água por capilaridade, Mashaly, Shalaby e Rashwan (2018) verificam, quando substituído o cimento por resíduos de granito até 20%, que há uma resistência à penetração de água em comparação a maiores substituições (30 e 40%). O motivo da redução é devido ao resíduo atuar preenchendo os poros entre o cimento e os agregados, o que diminui a permeabilidade da água. Nos maiores teores de substituições, a penetração da água aumenta, devido à diminuição dos materiais cimentícios, tornando a microestrutura porosa e os poros capilares maiores.

Devido ao resíduo de rochas ornamentais possuírem partículas finas, o tamanho dos poros capilares diminui, diminuindo a porosidade da argamassa, tornando-a mais rígida e menos porosa e sensível à fissuração. (MATTA *et al.*, 2013). Oliveira *et al.* (2011) verificam a densidade de massa no estado endurecido através de diferentes teores de substituição de cimento e granulometrias dos resíduos de granito. Ao aumentar o teor de substituição e granulometria, a densidade de massa das argamassas aumenta, conforme mostra a figura 12.

Figura 12 - Densidade de argamassas com resíduos de rochas ornamentais



Fonte: Oliveira *et al.* (2011)

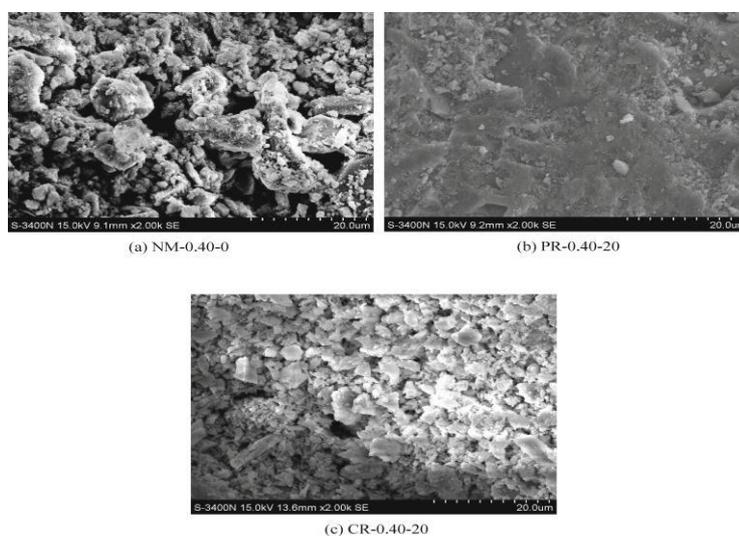
### 3.5.2.3 Microestruturas

Através das imagens geradas pelo MEV Vardhan *et al.* (2015), observa-se que as amostras com resíduos de mármore não apresentam uma estrutura homogênea, como as estruturas de referência, apenas com cimento. As amostras de argamassa que contêm apenas cimento têm sua estrutura totalmente formada e seus vazios preenchidos, enquanto que a estrutura com grandes níveis de substituições apresenta grande número de vazios. Desta forma, o alto nível de substituição leva a intensificar o aumento da porosidade, prejudicando as propriedades mecânicas das pastas de cimento, tendo uma hidratação retardada e uma microestrutura porosa.

Conforme Singh, Srivastava e Bhunia (2017) verificam através da análise de TGA, os resíduos de mármore contidos na pasta, não participam do processo químico da mesma. Desta forma inerte, aos 28 dias não há nenhuma alteração específica nas fases, apenas as pequenas alterações nas fases do hidróxido de cálcio e C-S-H, devido à diferença de água utilizada nas reações de hidratação.

Li *et al.* (2019b), ao analisarem por microscopia eletrônica de varredura (MEV) a microestrutura de três diferentes tipos de amostras de argamassas conforme figura 13: argamassa referência sem a incorporação de resíduo de mármore; argamassa com a substituição de 20% da pasta (cimento e água) por resíduo de mármore; argamassa com a substituição de 20% do cimento por resíduo de mármore. Todas com a mesma relação a/c de 0,40.

Figura 13 - Microscopia eletrônica de varredura de três tipos de argamassa



Fonte: Li *et al.* (2019b)

Verifica-se que a argamassa referência sem o resíduo de mármore apresenta a formação de grandes cristais. A microestrutura aparenta pequena aderência entre os grãos com grandes quantidades de extensos vazios no seu interior, conforme a figura (a). Para a argamassa com substituição da pasta pelo resíduo de mármore, verifica-se menor quantidade de cristais com tamanhos extensos e formação de uma microestrutura mais densa e compacta, conforme a figura (b). Para a argamassa com substituição do cimento, são verificados alguns cristais de grandes dimensões. A microestrutura estava excessivamente solta, com a presença de muitos vazios de pequenos tamanhos incorporados no seu interior, conforme a figura (c).

#### 3.5.3.4 Retração

As retrações ocorrem nas primeiras idades das argamassas, durante e após o seu endurecimento. O processo de retração está envolvido com as reações químicas dos aglomerantes e a perda de água que foi adsorvida nos produtos hidratados durante o processo de secagem. (KOPSCHITZ *et al.*, 1997; SÁNCHEZ *et al.*, 1997).

A retração é o endurecimento junto à diminuição de volume, devido à perda de água por evaporação ou pelas reações de hidratação, causando o aparecimento de fissuras. (FIORITO, 2009).

Conforme Sabbatini e baía (2000) apud Santos 2008, diversos fatores favorecem a retração plástica em uma argamassa, como evaporação da água por

amassamento, reações de hidratação e carbonatação dos aglomerantes, causando fissurações na argamassa. Contudo, Oliveira (2001) a retração está diretamente ligada à estanqueidade e durabilidade dos revestimentos, tendo como principais fatores para sua ocorrência: o teor de aglomerante, o volume de água, a granulometria do agregado e as condições que serão expostas ao revestimento.

Devido aos resíduos possuírem uma granulometria muito fina e uma maior área superficial, absorvendo maior quantidade de água, maior é a retração das argamassas. (KABEER e VYAS, 2018; SILVA, 2017).

### 3.5.3.5 Resistência à Aderência em Revestimentos

Diversos fatores influenciam a resistência de aderência, como: capacidade de absorção de água, porosidade e rugosidade do substrato. (BAUER, 2005; SCARTEZINI *et al.*, 2002). Diversos fatores influenciam a ligação adesiva da argamassa com o substrato, como: a textura superficial auxilia na penetração dos fluidos da argamassa nos poros dos substratos, a absorção de água atua na relação substrato/reboco na adesão do revestimento. (SILVA; FLORES-COLEN; GASPAR, 2013).

Nobrega *et al.* (2014) verificaram a resistência à aderência aos 28 dias. Ao substituir o cimento pelo resíduo de rochas ornamentais, há uma diminuição gradual da resistência à aderência.

Apolinário (2014), ao verificar a resistência à aderência das argamassas simples (cimento e areia), constatou que em substituições de 5 a 15% há um aumento da resistência entre 15 a 27% em relação à referência. Também há uma melhora no empacotamento das partículas, visto que em 5% de substituição há poucas rupturas no interior das argamassas. A maior parte das rupturas foi entre o substrato e a interface substrato/chapisco. Em teores maiores, entre 10 a 15%, não há rupturas no interior da argamassa.

## **4 PROGRAMA EXPERIMENTAL**

No presente capítulo, foi tratado o programa experimental, as variáveis de controle, variáveis fixas e não controladas, as possíveis variáveis de resposta, todos os materiais que foram utilizados para a fabricação das argamassas e todos os ensaios para a caracterização dos materiais e análise das argamassas no estado fresco, endurecido e na forma de revestimento.

### **4.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL**

Neste item são retratados os parâmetros utilizados para a elaboração do programa experimental.

#### **4.1.1 Fatores Fixos de Controle**

- O tipo de cimento utilizado foi o CP V-ARI, por possuir até 10% de material carbonático e não ter adição de pozolânas;
- Agregado miúdo (areia de rio) com diâmetro Max = 2.4mm;
- Idades dos ensaios conforme o tipo de ensaio;
- Consistência fixa em  $(260 \pm 5 \text{mm})$ .

#### **4.1.2 Fatores Variáveis de Controle**

- Substituição parcial de cimento por resíduos de rochas ornamentais, nos teores de 10%, 15% e 20%. Os teores de substituição foram escolhidos de acordo com as literaturas da tabela 4. Em função dos resultados encontrados pelos autores, foi escolhido um teor maior de substituição (20%).

#### **4.1.3 Fatores Não Controláveis**

- Temperatura de moldagem;
- Umidade relativa do ar.

#### 4.1.4 Variáveis de Resposta

- Retenção de água;
- Retração das argamassas;
- Resistência à compressão e tração 7, 14 e 28 dias
- Módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias;
- Densidade da argamassa aos 28 dias;
- Absorção de água por imersão aos 28 dias;
- Índice de vazios aos 28 dias;
- Absorção de água por capilaridade aos 28 dias;
- Efeito da nucleação a partir de diferenças de temperatura ao longo de 24 horas;
- Resistência da aderência em revestimentos cerâmicos 7, 14 e 28 dias.

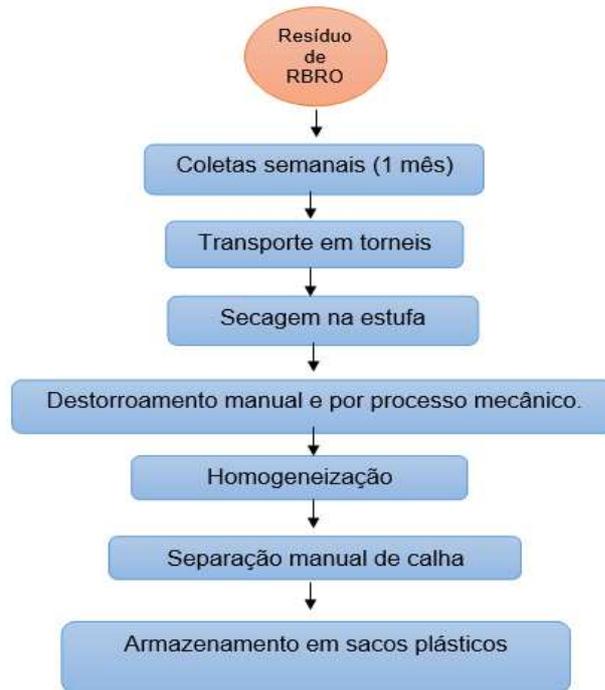
#### 4.2 MATERIAIS

No presente item estão contidas as principais características dos materiais utilizados no trabalho.

##### 4.2.1 Resíduo

O resíduo utilizado foi procedente de uma marmoraria, localizada em São Leopoldo, no Rio Grande do Sul. Escolheu-se apenas uma marmoraria para a coleta dos resíduos, devido ao fato da empresa possuir boa estrutura de captação e gerar grandes quantidade de resíduos. Segundo o responsável, são processados diariamente em torno de 10 a 20 m<sup>2</sup> de chapas de rochas ornamentais. A empresa trabalha com diversas rochas ornamentais, como mármore, granito, silestone (pedra industrializada, composta por 94% de quartzo natural, resina e pigmentos), basalto, ardósia, Miracema, caxambu e pedra ferro. Os resíduos foram coletados na forma de lama, decorrentes dos processos de polimento e corte das chapas de rochas ornamentais ocorrerem em meio aquoso. A coleta e a amostragem do resíduo foram feitas conforme o fluxograma da figura 14.

Figura 14 - Fluxograma da obtenção do resíduo de rochas ornamentais



Fonte: Elaborada pelo autor

Os resíduos provenientes do polimento e corte dos chapas foram coletados durante 1 mês (1 coleta a cada semana) do tanque de decantação, em forma de lama, conforme a figura 15.

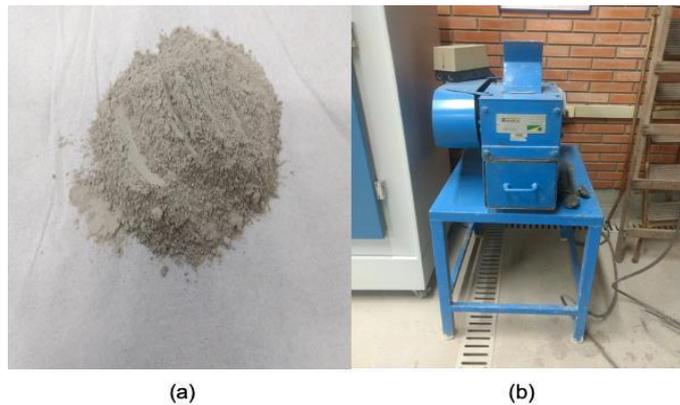
Figura 15 - Lama de rochas ornamentais



Fonte: Elaborada pelo autor

Após coletados em baldes plásticos, os resíduos foram encaminhados para o laboratório de materiais de construção da Unisinos, e posteriormente foram secos em estufa a uma temperatura de aproximadamente  $105 \pm 5$  °C durante 3 dias, até a constância de massa. Após secos, os resíduos foram destorroados de forma manual e por processo mecânico (moinho de rolo), a fim de desmanchar os torrões provenientes da secagem, conforme a figura 16.

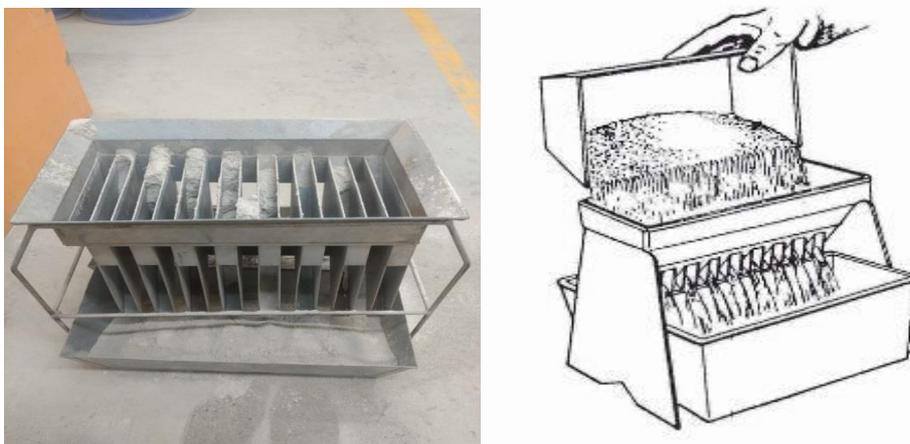
Figura 16 - Resíduos RBRO moídos (a); moinho de rolo (b)



Fonte: Elaborada pelo autor

O método adotado para a realização da homogeneização das amostras foi por separador manual de calha. Conforme a NBR NM 27 (ABNT, 2001), método “A”, as amostras foram colocadas no separador manual e distribuídas uniformemente em uma velocidade que permitisse com que passassem livremente sobre as calhas. O processo foi repetido 4 vezes para uma melhor homogeneização, conforme a figura 17.

Figura 17 - Separador manual de calha



Fonte: Elaborada pelo autor/ NBR NM 27 (ABNT, 2001)

Após homogeneizado, o resíduo foi separado e etiquetado em sacos plásticos, conforme a figura 18.

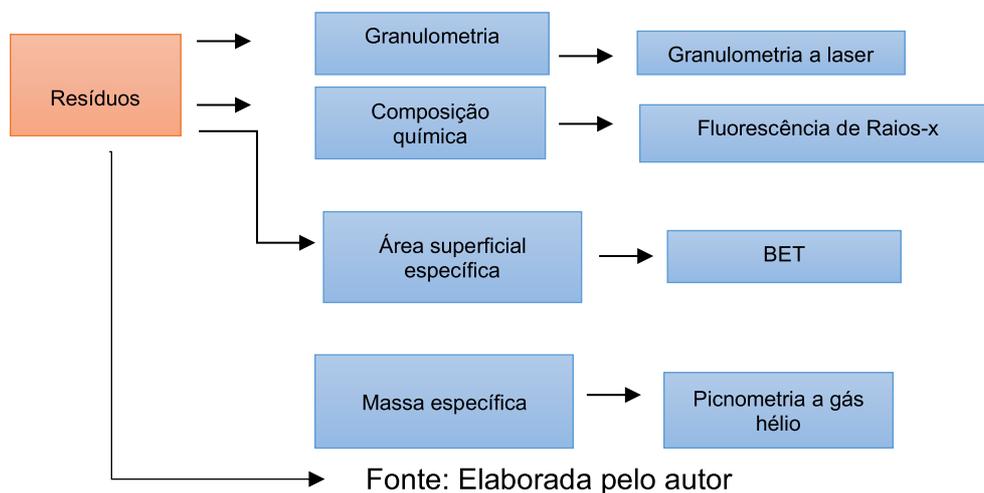
Figura 18 - Resíduos separados e identificados



Fonte: Elaborada pelo autor.

Após a separação, os resíduos foram caracterizados conforme a figura 19.

Figura 19 - Fluxograma de resíduos de rochas ornamentais



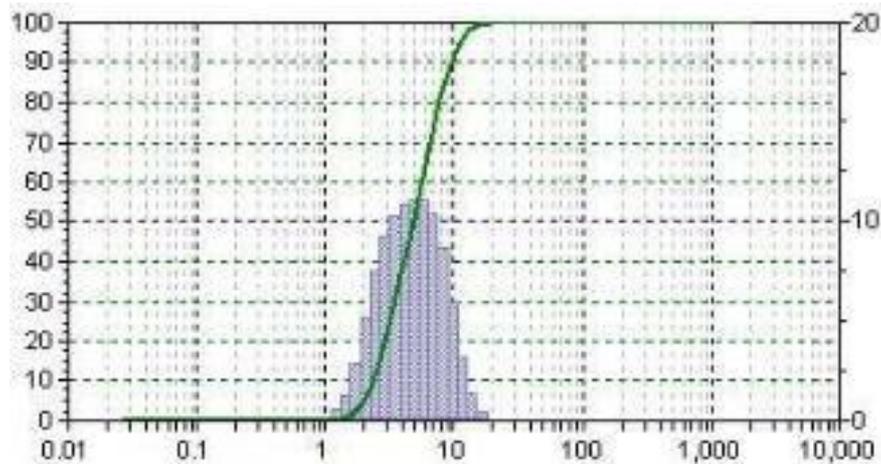
#### 4.2.1.1 Adequação Granulométrica do Resíduo

A adequação granulométrica do resíduo foi através do material passante da peneira nº 200. Após feita a adequação granulométrica dos resíduos, os mesmos foram colocados em sacos plásticos e identificados.

#### 4.2.1.2 Distribuição Granulométrica

Para verificar as dimensões das partículas dos resíduos de rochas ornamentais, foi feito o ensaio de granulometria a laser no LCVMAT da Unisinos, conforme a figura 20 e a tabela 5. O ensaio foi realizado em solução líquida (água), com os resíduos de rochas ornamentais em suspensão, homogêneo com dispersante em pequenos teores (0,5%) da massa da amostra. A amostra foi agitada e dispersa com o auxílio de um agitador (ultrassom interno 40w) por um período de 10 minutos, que separou todas as partículas agregadas, para não alterar os resultados das dimensões das partículas. O equipamento utilizado para a realização do ensaio foi o Microtac modelo S3500.

Figura 20 - Granulometria a laser dos resíduos de rochas ornamentais.



Fonte: Laboratório de caracterização e valorização dos materiais da Unisinos.

Tabela 5 - Resultados da granulometria a laser dos resíduos de rochas ornamentais

<b>Análise granulométrica</b>	<b>Dimensões (µm)</b>
<b>D10</b>	2,327
<b>D50</b>	4,80
<b>D90</b>	9,49

Fonte: Elaborada pelo autor

#### 4.2.1.3 Composição Química

Foi efetuado o ensaio de fluorescência de raios-x (FRX) para analisar qualitativamente os elementos químicos presentes na amostra de resíduo, conforme

a tabela 6. O ensaio consiste em um método não destrutivo, baseado na emissão de radiação que caracteriza os elementos químicos presentes quando excitados. Para a preparação das amostras, o resíduo foi passado na peneira de 0,15mm, e depois prensado de forma manual em formato de pastilha. A mesma tinha aproximadamente 2g e diâmetro de aproximadamente de 15 mm. Desta forma, foram obtidos os dados e informações necessárias para verificar a composição mineralógica através da análise qualitativa. As amostras foram preparadas no laboratório de caracterização e valorização dos materiais (LCVMAT) da Unisinos.

Tabela 6 - Elementos químicos presentes nas amostras de resíduos de rochas ornamentais.

<sup>2</sup> Menor quantidade (5% < x < 50%)	Elementos traços (< 5%)
Si, Fe, Ca, K, Al	Ti, Ba, S, Zr, Mn, Sr, Rb, Zn, Y

Fonte: Elaborada pelo autor

Através do ensaio fluorescência de raio-x (FRX), foi possível verificar os principais elementos químicos encontrados nos resíduos de rochas ornamentais.

Quando comparados os elementos químicos encontrados nos resíduos de rochas ornamentais do presente trabalho, é possível observar que houve semelhanças com os elementos químicos encontrados por outros pesquisadores. (AKBULUT *et al.*, (2012); BACARJI *et al.* (2013); EL-ALFI e GADO. (2016); MASHALY; SHALABY; RASHWAN (2018); TOPÇU; BILIR; UYGUNOGLU. (2009); XI *et al.*, (2019)). Sendo que a maior predominância na composição química encontrada pelos pesquisadores foi de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e CaO, mudando apenas a concentração de cada elemento devido a sua formação geológica.

Conforme Santos *et al.* (2018), os resíduos de mármore são compostos basicamente por Ca e Mg. Devido a sua matriz ser uma rocha carbonática, há pouca atuação química nas pastas de cimento. Segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014), para um material ser classificado como pozolânico, é necessário que a somatória dos teores de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> seja maior ou igual 70%. Contudo, os resíduos de rochas ornamentais apresentam apenas somatório de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> de 3,13%.

<sup>2</sup> O laboratório caracteriza os elementos encontrados em elementos majoritários > 50%, menor quantidade (5% < x < 50%) e elementos traços (< 5%). A caracterização química não encontrou nenhum elemento majoritário; apenas em menor quantidade e elementos traços.

#### 4.2.1.4 Área Superficial e Massa Específica

Para um melhor entendimento sobre as características físicas das partículas dos resíduos de RBRO, mediram-se a área superficial e a massa específica do resíduo de rocha ornamental, conforme a tabela 7.

A área superficial foi medida através do método de BET, utilizando o equipamento TriStar II Plus da Micromeritics. Os ensaios foram realizados no LCVMAT da Unisinos. Como parâmetro para realização do ensaio de BET, foi adotado o método de Mantellato, Palacios e Flatt. (2015). A temperatura variou de 40 a 150°C, o vácuo foi de 2,67Pa e a adsorção de nitrogênio teve fluxo de  $3 \cdot 10^{-3}$  m<sup>3</sup>/h.

A massas específicas dos resíduos de rochas ornamentais foram obtidas através do ensaio de picnometria a gás hélio. O modelo foi AccupyC II 1340, da Micromeritics.

Tabela 7 - Caracterização dos resíduos de rochas ornamentais

<b>Caracterização do resíduo de rocha ornamental</b>	
<b>Área superficial m<sup>2</sup>/g</b>	2.4750 ± 0.0049
<b>Massa específica g/cm<sup>3</sup></b>	2,6667

Fonte: Elaborada pelo autor

Apesar dos resíduos do presente trabalho serem formados por diversos tipos de rochas ornamentais, quando comparados às massas específicas de outros pesquisados. (FONSECA (2016); OLIVEIRA (2015)), é possível verificar que há semelhança nos resultados encontrados.

#### 4.2.2 Cimento

O cimento escolhido para o trabalho foi CP V-ARI. Conforme a NBR 16697 (ABNT, 2019), o cimento possui até 10% de material carbonático, e não contém material pozolânico em sua composição. As caracterizações físicas e químicas do cimento estão contidas na tabela 8.

Tabela 8 - Caracterização física e química do cimento

Ensaio		Resultados	Requisitos exigidos pela NBR 16697 (ABNT, 2019)
<b>*Massa específica (kg/dm<sup>3</sup>)</b>		3,05	-
<b>*Finura</b>	Peneira #200	0,3	<=6,0
	Peneira#325	1,4	-
<b>**Granulometria a laser</b>	D10(μm)	6,91	
	D50(μm)	14,20	-
	D90(μm)	28,55	
<b>**Área superficial</b>	m <sup>2</sup> /g	1,8210± 0,0028	-
<b>*Tempo de pega</b>	Início (h:min)	272	>=60
	Fim (h:min)	326	<=600
<b>*Blaine (m<sup>2</sup>/kg)</b>		4,625	-
<b>*Resistência à compressão (MPa)</b>	1 dia	21,7	>=14
	3 dias	37,2	>=24
	7 dias	42,7	>=34
<b>*Componentes químicos</b>	MgO (%)	3,90	<=6,50
	SO <sub>3</sub> média (%)	3,1	<=4,50
	Perda ao fogo	5,1	<=6,50
	média (%)		

**Observação: Os dados foram obtidos através do fabricante e do LCVMAT da Unisinos. (\*fabricante; \*\* LCVMAT).**

Fonte: Elaborada pelo autor

Para a determinação do teor de material carbonático do cimento foi realizado o ensaio de termogravimetria (TGA). A decomposição do carbonato de cálcio ocorre entre as temperaturas de 550°C e 700°C. (SEBASTIANY, (2014)).

#### 4.2.3 Cal

A cal utilizada foi a Cal Hidratada do tipo CH-II. As caracterizações físicas e químicas da cal estão apresentadas na tabela 9.

Tabela 9 - Caracterização física e química da cal

<b>*Caracterização da cal hidratada CH-II</b>	<b>Resultados</b>	<b>Requisitos exigidos pela NBR 7175 (ABNT, 2003a)</b>
<b>**Massa específica</b>	2,327 g/cm <sup>3</sup>	-
<b>*Finura</b>	Peneira 0,600 mm (%)	≤ 0,5
	Peneira 0,075mm (%)	≤ 15
<b>**Granulometria</b>	D10 (µm)	5,90
	D50 (µm)	9,41
	D90 (µm)	12,54
<b>*Densidade (g/l)</b>	568,00	≤ 600
<b>*Resíduos insolúveis (%)</b>	8,48	-
<b>*Umidade (%)</b>	0,13	≤ 1,5
<b>*CO<sub>2</sub> (%)</b>	3,18	-
<b>*Óxidos total (%)</b>	89,28	≥ 88
<b>*Ox. não hidratado (%)</b>	14,93	≤ 15
<b>*CaO (%)</b>	44,06	-
<b>MgO (%)</b>	26,27	-
<b>Perda ao fogo (%)</b>	21,28	-

Observação: Os dados foram obtidos através do fabricante e do LCVMAT da Unisinos.  
(\*fabricante; \*\* LCVMAT).

Fonte: Elaborada pelo autor

#### 4.2.4 Agregado Miúdo

O agregado miúdo foi areia de rio de origem quartzosa, vendida comercialmente. A caracterização do agregado miúdo foi feita de acordo com o quadro 1.

Quadro 1 - Caracterização do agregado miúdo

<b>Ensaio</b>	<b>Norma</b>
Granulometria	NBR NM 248 (ABNT, 2003b)
Massa específica	NBR NM 52 (ABNT, 2009b)

Fonte: Elaborada pelo autor

Na tabela 10 estão contidas as caracterizações do agregado miúdo utilizado na fabricação das argamassas.

Tabela 10 - Caracterização do agregado miúdo

<b>Peneira (mm)</b>	<b>Retida (%)</b>	<b>Acumulada (%)</b>
4,8	0,1	0,1
2,4	0,2	0,3
1,2	0,2	0,4
0,6	10,8	11,2
0,3	54,4	65,6
0,15	32,1	97,7
<0,15	2,3	100
total	100	-
<b>Massa específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>		2,63
<b>Módulo de finura</b>		1,75
<b>Dimensão Máxima (mm)</b>		1.2

Fonte: Elaborada pelo autor

Para um melhor entendimento sobre a influência que os resíduos RBRO tiveram sobre as argamassas, foi necessário conhecer o teor de materiais finos (pulverulentos) presentes na areia, como também a distribuição granulométrica da fração de materiais finos. Os métodos de caracterização desses materiais finos estão apresentados no quadro 2.

Quadro 2 - Caracterização dos materiais finos

<b>Ensaio</b>	<b>Norma</b>
Materiais finos	NBR NM 46 (ABNT, 2003c)
Granulometria	Granulometria a laser

Fonte: Elaborada pelo autor

Na tabela 11 estão contidas as caracterizações dos materiais finos presentes no agregado miúdo. Os dados foram obtidos através do LCVMAT.

Tabela 11 - Caracterização dos materiais finos da areia

<b>Materiais pulverulento (%)</b>		<b>0,7</b>
<b>Granulometria a laser</b>	D10 ( $\mu\text{m}$ )	1,536
	D50 ( $\mu\text{m}$ )	3,72
	D90 ( $\mu\text{m}$ )	11,07
<b>Área superficial (<math>\text{m}^2/\text{g}</math>)</b>	27.2023 $\pm$ 0.0631	

Fonte: Elaborada pelo autor

Para fabricação do chapisco, tornou-se necessária a utilização de uma areia mais grossa. A distribuição granulométrica é apresentada, na tabela 12.

Tabela 12 - Granulometria areia chapisco

<b>Caracterização do agregado miúdo</b>		
<b>Peneira (mm)</b>	<b>Retida (%)</b>	<b>Acumulada (%)</b>
4,8	0,2	0,2
2,4	2	2,2
1,2	5,1	7,3
0,6	12,2	19,5
0,3	37,4	56,9
0,15	34,7	91,5
<0,15	8,5	100
total	100	-
<b>Módulo de finura</b>	1,78	
<b>Dimensão Máxima (mm)</b>	1.2	

Fonte: Elaborada pelo autor

#### 4.2.5 Blocos Cerâmicos

Na tabela 13 estão contidas as características físicas dos blocos cerâmicos utilizados no presente trabalho. Os dados obtidos foram do fabricante.

Tabela 13 - Características físicas dos blocos cerâmicos

<b>Blocos cerâmicos</b>			
<b>Lote</b>	190101		
<b>Dimensões (mm)</b>	Largura	Altura	Comprimento
<b>(Média)</b>	139,9	191,8	290,1
<b>Resistência à compressão (MPa) (Média)</b>	8,9		
<b>Absorção de água (%) (Média)</b>	13,1		
<b>Massa específica (kg/m<sup>3</sup>) (Média)</b>	1796		
<b>Absorção de água inicial (g/194<sup>2</sup>/min) (Média)</b>	53		

Fonte: Elaborada pelo autor

#### 4.3 PRODUÇÃO DAS ARGAMASSAS

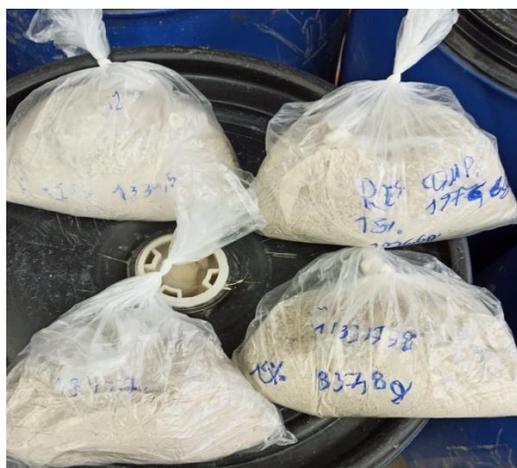
O traço escolhido para as argamassas de revestimento foi 1:1:6 (cimento:cal:areia) em massa. A partir do traço referência, houve a substituição de 10%, 15% e 20% de cimento por resíduos de rochas ornamentais em volume real, com consistência fixa de  $260 \pm 5$  mm (mesa de consistência). A preparação das argamassas foi feita na argamassadeira de eixo horizontal, no laboratório de materiais de construção da Unisinos. O procedimento de mistura foi de acordo com a NBR 13276 (ABNT, 2016).

A cal foi preparada com antecedência de 16 a 24 horas (período de maturação) antes de ser utilizada. Os componentes para a preparação da maturação foram: areia, água e cal hidratada. Misturou-se todos os componentes em velocidade baixa por 4 minutos. Após misturada, foi colocada em sacos plásticos e pesada. Após o intervalo de maturação, pesou-se novamente todo o material, a fim de para verificar se houve

possíveis perdas de água, conforme a figura 21, em seguida foi adicionado o cimento e homogeneizado durante 4 minutos.

Com a fixação da consistência em todos os traços em 260+ 5 mm, conforme o indicado pela NBR 13276 (ABNT, 2016), foi encontrado o teor de água do traço referência. Com o objetivo de evitar que diferentes relações água/ligante interferissem nos resultados de caracterização, a relação a/c 1,32 do traço de referência foi adotada para todas as demais misturas. Para garantir a mesma trabalhabilidade em todas as misturas com a substituição parcial do cimento por resíduos de rochas ornamentais, tornou-se necessário o uso de aditivo superplastificante para atingir a consistência necessária, mantendo a relação a/c do traço referência.

Figura 21 - Cal maturada por 24 horas



Fonte: Elaborada pelo autor

#### 4.4 ENSAIOS DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO E ENDURECIDO

Após a produção das argamassas, as mesmas foram analisadas no estado fresco, endurecido e em forma de revestimento.

##### 4.4.1 Caracterização no Estado Fresco

As propriedades da argamassa no estado fresco foram determinadas conforme o quadro 3.

Quadro 3 - Propriedades da argamassa no estado fresco

ENSAIO	NORMA
Consistência	NBR 13276 (ABNT, 2016)
Retenção de água	NBR 13277 (ABNT, 2005a)
Densidade de massa	NBR 13278 (ABNT, 2005b)

Fonte: Elaborada pelo autor

#### 4.4.2 Caracterização no Estado Endurecido

No estado endurecido, as propriedades foram verificadas conforme a tabela 14.

Tabela 14 - Propriedades no estado endurecido

ENSAIO	NORMA	AMOSTRAGEM	IDADE	Corpo-de-Prova	Dimensões	Cura	Condição de umidade (%)	Temperatura (°C)
<b>Densidade de massa</b>	NBR 13280 (ABNT, 2005d)	3 para cada tipo de argamassa	28 dias	Prismáticos	4cm x 4 cm x 16 cm	Úmida	60± 5	23±2
<b>Varição volumétrica (no estado endurecido)</b>	NBR 15261 (ABNT, 2005f)	3 para cada tipo de argamassa	3,10,17,31 dias	Prismáticos	25 mm x 25 mm x285mm	Sala climatizada	60± 5	23 ± 2
<b>Resistencia à compressão</b>	NBR 13279 (ABNT, 2005c)	3 para cada tipo de argamassa	7,14 e 28 dias	Prismáticos	4 cm x 4 cm x 16 cm	Úmida	60± 5	23 ± 2
<b>Resistencia à tração</b>	NBR 13279 (ABNT, 2005c)	3 para cada tipo de argamassa	7,14 e 28 dias	Prismáticos	4 cm x 4 cm x 16 cm.	Úmida	60± 5	23 ± 2
<b>Módulo de elasticidade dinâmico</b>	NBR 15630 (ABNT, 2009a)	3 para cada tipo de argamassa	28 dias	Prismáticos	Os transdutores serão centralizados nas faces opostas (4 cm x 4 cm).	Úmida	60± 5	23 ± 2
<b>Absorção de água por imersão</b>	NBR 9778 (ABNT, 2005g)	3 para cada tipo de argamassa	28 dias	Prismáticos	4 cm x 4 cm x 16 cm.	Úmida	60± 5	23 ± 2

<b>Índice de vazios</b>	NBR 9778 (ABNT, 2005g)	3 para cada tipo de argamassa	28 dias	Prismáticos	4 cm x 4 cm x 16 cm.	Úmida	60± 5	23 ± 2
<b>*Absorção de água por capilaridade</b>	RILEM TC 116 PCD (1999), adaptado para revestimento (SCHAFER, 2015).	3 para cada tipo de argamassa	28 dias	Prismáticos	4 cm x 4 cm x 16 cm	Úmida	60± 5	23 ± 2

Fonte: Elaborada pelo autor

\* Após a confecção dos corpos de prova para o ensaio de absorção de água por capilaridade, os mesmos foram cortados em três fatias da região central com altura aproximada de 3 cm para a realização do ensaio, tendo 3 fatias para cada tipo de argamassa. Os corpos foram mantidos na estufa em temperatura de 40°C até a estabilização de massa, posteriormente, foram colocados no dessecador até atingirem a temperatura ambiente em sala controlada (20°C±1°C). Depois de serem seladas as laterais com tinta adesiva e colocado um balão de látex na superfície superior, para não ter influência com a umidade externa, a absorção de água por capilaridade foi monitorada através da pesagem das amostras nos seguintes intervalos de tempo: 1,2,5,10,20,30 minutos e 1,2 horas.

Para uma melhor interpretação dos dados, foi realizada uma análise de variância (ANOVA), apenas nos ensaios no estado endurecido, devido, a maior quantidade de corpos de prova.

#### 4.5 PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS EM FORMA DE REVESTIMENTO

O ensaio foi realizado conforme a NBR 13528 (ABNT, 2010). Para a realização do ensaio, foi escolhido como substrato blocos cerâmicos, e para uma maior eficiência da aderência foi aplicado o chapisco em camada única de espessura igual ou inferior a 5 mm. Os blocos cerâmicos escolhidos tiveram dimensões de 14x19x29 cm, o traço em volume escolhido para o chapisco foi de (1:3), a aplicação foi feita com o auxílio de mestre pedreiro. Após 72 horas de cura do chapisco, o mestre pedreiro realizou a aplicação das argamassas, a espessura do revestimento foi de 2,5 cm e a área superficial coberta pela argamassa foi de 29 x 19 cm. Os revestimentos foram curados por 28 dias (sala climatizada a uma temperatura de 23±2 °C e umidade 60 ± 10 %),

conforme a figura 22. O equipamento utilizado para analisar a resistência de aderência foi o modelo DS2-DPU-1100 da marca Dinatest.

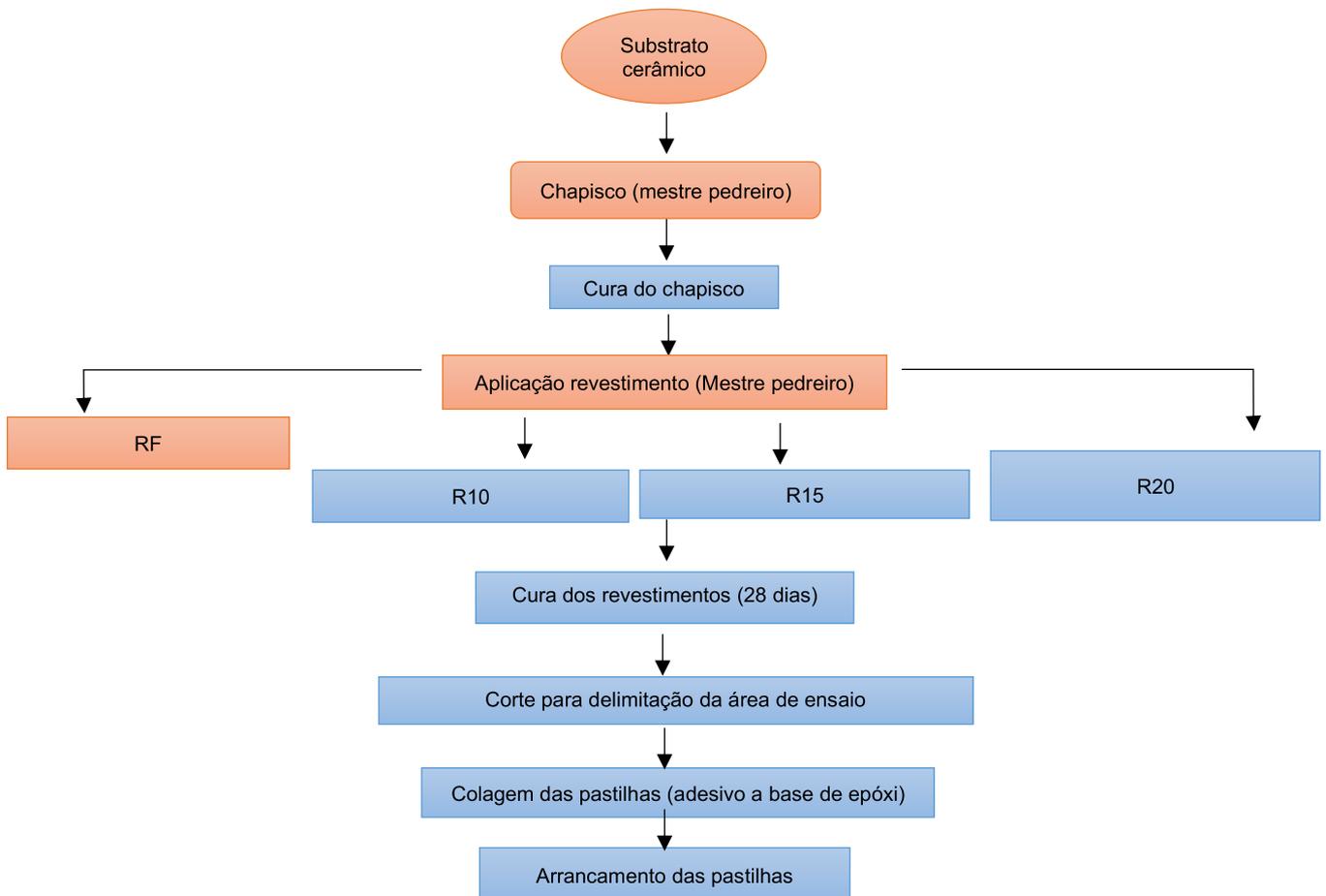
Figura 22 - Blocos cerâmicos com aplicações do revestimento



Fonte: Elaborada pelo autor

O ensaio de resistência à tração na aderência foi conforme a figura 23:

Figura 23- Fluxograma do ensaio de aderência em revestimentos cerâmicos



Fonte: elaborada pelo autor

## 4.6 EFEITOS DA NUCLEAÇÃO NAS ARGAMASSAS

Os efeitos da nucleação nas argamassas foram avaliados pelo ensaio de calorimetria semi-adiabática a partir de diferenças de temperaturas ao longo de 24 horas.

### 4.6.1 Avaliação da Nucleação a partir de diferenças de Temperatura

A evolução da temperatura das reações de hidratação foi efetuada por calorímetro semi-adiabático, e o ensaio foi realizado no laboratório de materiais de construção da Unisinos. Os dados foram coletados com um auxílio de um registrador Pico log ligado a um computador. Os termopares foram introduzidos no interior das amostras, conforme a figura 24. Forneceram-se dados informacionais sobre a geração das curvas de temperaturas, e foram confeccionados 7 tipos de argamassas, com aproximadamente 300 g cada, conforme o Quadro 4.

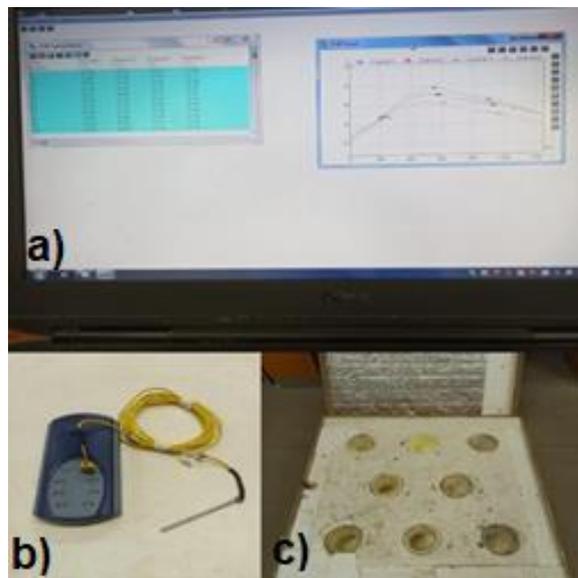
Para um melhor entendimento da evolução da temperatura das reações de hidratação, foi feita a comparação das argamassas com substituições de partes do cimento pelo resíduo e da mesma argamassa, retirando-se o respectivo percentual de cimento, sem adicionar o resíduo, conforme apresentado no quadro 4.

Quadro 4 - Argamassas para verificação da evolução de temperatura das reações de hidratação

Argamassa	Abreviação	Medição por amostras
Referência	RF	3
10% de substituição	R10	3
10% sem o resíduo	R10 SEM	3
15% com resíduo	R15	3
15% sem o resíduo	R15 SEM	3
20% com o resíduo	R20	3
20% sem o resíduo	R20 SEM	3

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 24 - Sistema de aquisição de dados (a); câmara semi-adiabática com sensores termopares(b); câmara fechada em andamento do ensaio(c).



Fonte: Elaborada pelo autor.

## 5 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

No presente item são apresentados e discutidos os resultados encontrados nos ensaios de caracterização dos materiais utilizados na pesquisa, para verificação das influências que os resíduos de rochas ornamentais tiveram nas propriedades das argamassas.

### 5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Neste item está contida a análise das características dos principais materiais do presente trabalho.

#### 5.1.1 Resíduos de Rochas Ornamentais

Neste item são retratados os resultados obtidos com a caracterização dos resíduos de rochas ornamentais.

##### 5.1.1.1 Granulometria

Através do ensaio de granulometria a laser, verificou-se que o material possui uma granulometria fina. Ramos *et al.* (2013) obtiveram menores diâmetros das partículas de resíduos de rochas ornamentais depois da moagem do resíduo. As mesmas ficaram com menores diâmetros do que as partículas de cimento, o que fez com que os resíduos de rochas ornamentais tornassem-se apropriados para o uso como filler.

Segundo Li *et al.* (2018), ao comparar as partículas de cimento com as partículas de resíduos de mármore em sua forma natural, sem algum processo de moagem, observou-se que ambas apresentaram distribuições contínuas de diâmetros. Contudo, o resíduo de mármore apresentou maior variação de diâmetro entre suas partículas, tendo-as com maiores e menores diâmetros do que as partículas de cimento. O motivo das menores partículas pode ser devido à baixa dureza do mármore (3, na escala de Mohs<sup>3</sup>). Desta forma, quando polidas, algumas partículas foram retificadas em tamanhos menores.

---

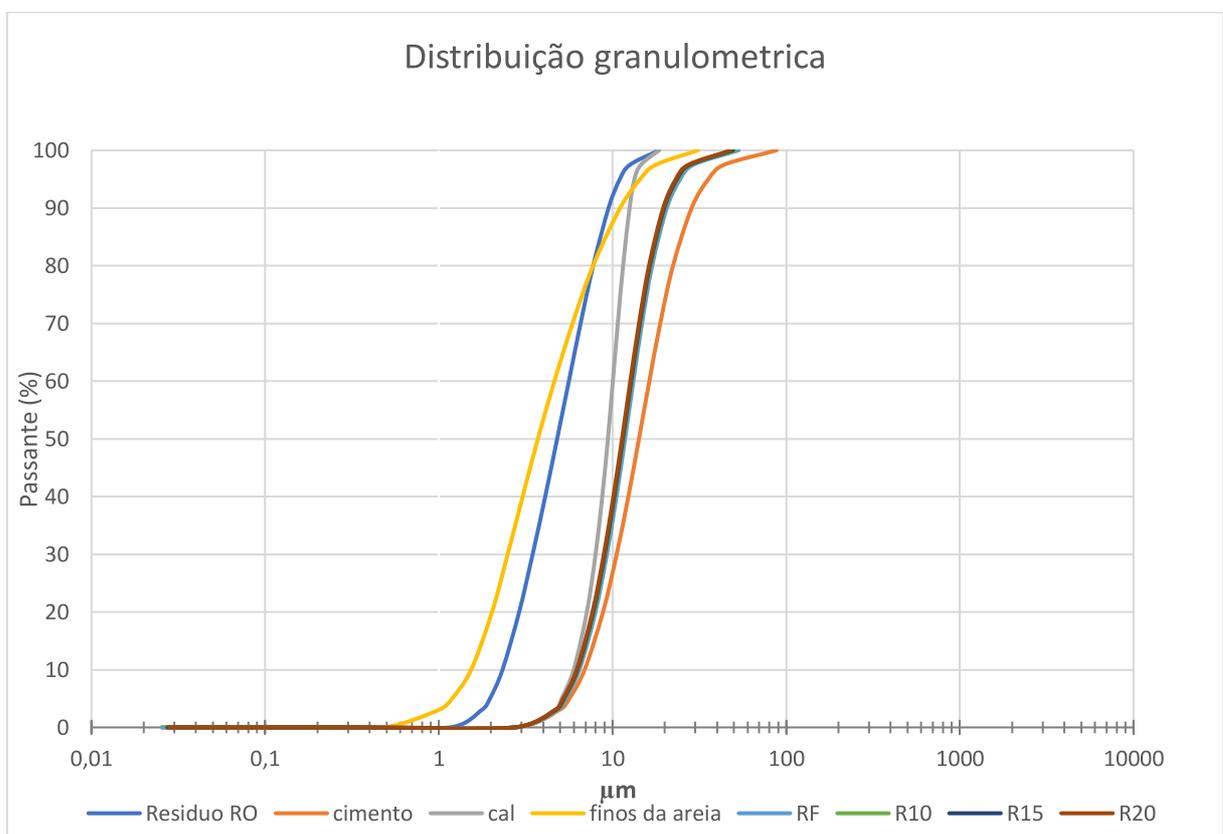
<sup>3</sup> A escala de Mohs quantifica a dureza dos minerais, medindo a resistência do mineral ao risco.

Para Li *et al.* (2019a), as diferenças de diâmetro encontradas nas partículas de granito estão associadas à composição química do granito, devido ao mesmo ser formado por quartzo, feldspato e mica. Durante os processos de retificação e polimento, o feldspato e a mica são mais fáceis de serem triturados em tamanhos menores, enquanto o quartzo apresenta uma maior dureza, o que o torna mais difícil de ser quebrado, permanecendo, assim, em maiores tamanhos.

Para Larrard (1989) apud De Castro e Pandolfelli (2009), a diminuição do diâmetro das partículas de adições minerais facilita a formação do efeito físico (efeito fíler) e o efeito químico (reações pozolânicas).

Através do gráfico 1 é possível observar que os resíduos de rochas ornamentais apresentam uma menor distribuição granulométrica entre os principais componentes das argamassas produzidas do presente trabalho. E, quando substituído o cimento por resíduos de rochas ornamentais, há uma tendência da diminuição da granulometria com o aumento do teor de substituição, conforme o gráfico 2.

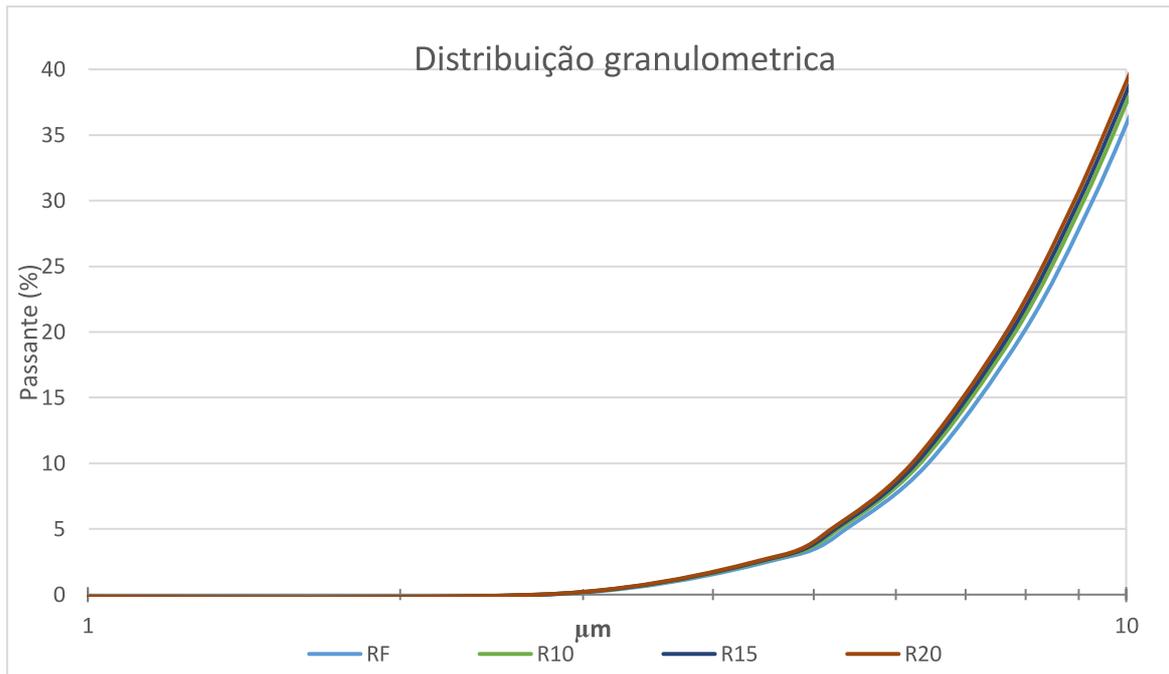
Gráfico 1 - Comparativo da distribuição granulométrica dos diferentes componentes e dos traços utilizados.



Fonte: Elaborada pelo autor

Para uma melhor visualização da distribuição granulométrica das argmassas produzidas, foi realizada uma ampliação do gráfico 1 com apenas as argmassas produzidas, conforme o gráfico 2.

Gráfico 2 - Ampliação da distribuição granulométrica



Fonte: Elaborada pelo autor

## 5.2 RESULTADO DA CARACTERIZAÇÃO DA ARGAMASSA NO ESTADO FRESCO

No presente item são apresentados e discutidos os resultados das propriedades das argmassas no estado fresco e a influência que os resíduos de rochas ornamentais tiveram nessas propriedades.

### 5.2.1 Consistência

Os resultados das consistências obtidas são apresentados na tabela 15.

Tabela 15 - Consistência das argamassas

traço	Teor de água H (%)	Relação a/c	Relação c/aditivo (%)
<b>RF</b>	17,7	1,32	0
<b>R10</b>	17,9	1,32	0,555
<b>R15</b>	18,0	1,32	0,803
<b>R20</b>	18,1	1,32	1,054

Fonte: Elaborada pelo autor

Através dos resultados obtidos, é possível observar que há, conforme citado por Khyaliya, Kabeer e Vyas (2017), maior superfície específica, rugosidade superficial e forma mais alongada nos resíduos de rochas ornamentais. Influenciam na trabalhabilidade e no consumo de água, desta forma, as argamassas produzidas com os resíduos de rochas ornamentais, necessitam de maiores quantidades de aditivo para compensarem o menor teor de água de amassamento necessário.

De acordo com Aiqin, Chengzhi e Ningsheng (1999), a distribuição granulométrica também pode exercer influência na quantidade de água necessária para produção de uma mistura com trabalhabilidade desejada, para uso em aplicação e adensamento. A demanda de água está associada à área superficial e à densidade de empacotamento das partículas: quanto maior a área superficial, menor a densidade de empacotamento e maior a demanda de água.

Resultados semelhantes foram encontrados por Li *et al.* (2018). Que ao substituírem o cimento por resíduos de mármore, verificaram a necessidade do uso de aditivo superplastificante para atingir a trabalhabilidade necessária. À medida que aumentava o teor da substituição, aumentava a quantidade de aditivo superplastificante.

Entretanto, ainda existe uma disparidade com os resultados encontrados por outros pesquisadores. Nobrega *et al.* (2014) verificaram que a trabalhabilidade da argamassa melhora com a substituição do cimento por resíduos de rochas ornamentais. Já para Ramos *et al.* (2013), a substituição do cimento por resíduos de rochas ornamentais não compromete a trabalhabilidade da argamassa. Desta forma, as argamassas com substituições obtêm resultados semelhantes à argamassa controle, não necessitando de maiores quantidades de aditivo superplastificante. Todavia, o presente trabalho verifica que, com o aumento do teor de substituição, há a necessidade de maiores teores de superplastificante para atingir a trabalhabilidade necessária. Tais resultados indicam que há grande variação nas propriedades dos

resíduos disponíveis, e que sua caracterização é fundamental para que se possa prever o seu efeito como substituição ao cimento.

### 5.2.2 Densidade de Massa no Estado Fresco

Na tabela 16 são apresentados os resultados obtidos com a densidade de massa no estado fresco das argamassas produzidas.

Tabela 16 - Densidade no estado fresco

Traço	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )
<b>RF</b>	2087,76
<b>R10</b>	2034,19
<b>R15</b>	2033,33
<b>R20</b>	2039,57

Fonte: Elaborada pelo autor

Ao verificar os requisitos para argamassa de assentamento e revestimento de paredes e tetos, segundo a NBR 13281 (ABNT, 2005e), observa-se que todas as argamassas produzidas estão na mesma classe D6, conforme a figura 25. De acordo com a norma NBR 13281 (ABNT, 2005e), deve ser considerado o desvio de cada ensaio.

Figura 25 - Requisitos de densidade de massa no estado fresco NBR 13281 (ABNT, 2005e)

Classe	Densidade de massa no estado fresco (kg/m <sup>3</sup> )	Método de ensaio
D1	≤ 1400	NBR 13278 (ABNT, 2005b)
D2	1200 a 1600	
D3	1400 a 1800	
D4	1600 a 2000	
D5	1800 a 2200	
D6	>2000	

Fonte: NBR 13281 (ABNT, 2005e).

### 5.2.3 Retenção de Água

A tabela 17 apresenta os resultados de retenção de água das argamassas produzidas.

Tabela 17 - Retenção de água

Traço	Retenção de água (%)
RF	97,20
R10	96,87
R15	98,30
R20	96,97

Fonte: Elaborada pelo autor

Conforme a NBR 13281 (ABNT, 2005e), as argamassas que apresentam entre 95 a 100% de retenção são classificadas na mesma ordem, ou seja, todas as argamassas produzidas ficaram na classe U6, conforme a figura 26. Assim, os resíduos de rocha ornamentais não exerceram influência na substituição do cimento nesta propriedade da argamassa no estado fresco. A alta retenção de água pode estar associada à função do uso da cal nas argamassas produzidas, conferindo-lhe essa propriedade. Resultados semelhantes foram encontrados por Santos (2008) que, ao substituir o cimento por resíduos de minerais, não obteve alterações significativas na retenção de água nas argamassas estudadas.

Figura 26 - Retenção de água NBR 13281 (ABNT, 2005e)

Classe	Retenção de água %	Método de ensaio
U1	≤ 78	NBR 13277 (ABNT, 2005a)
U2	72 a 85	
U3	80 a 90	
U4	86 a 94	
U5	91 a 97	
U6	95 a 100	

Fonte: NBR 13281 (ABNT, 2005e).

Como a substituição do cimento por resíduos de rochas ornamentais não alterou de forma significativa essa propriedade, a substituição permite que haja mesma quantidade de água disponível para ocorrer a hidratação do cimento.

Para Freitas (2010) e Silva (2017), o aumento de retenção de água da argamassa pode ser obtido com o aumento de materiais constituintes com elevada

área superficial. Como o material possui partículas muito finas, tende a aumentar a área molhável, e mantém a água adsorvida nas partículas, favorecendo a captação de água.

#### 5.2.4 Teor de Ar Incorporado

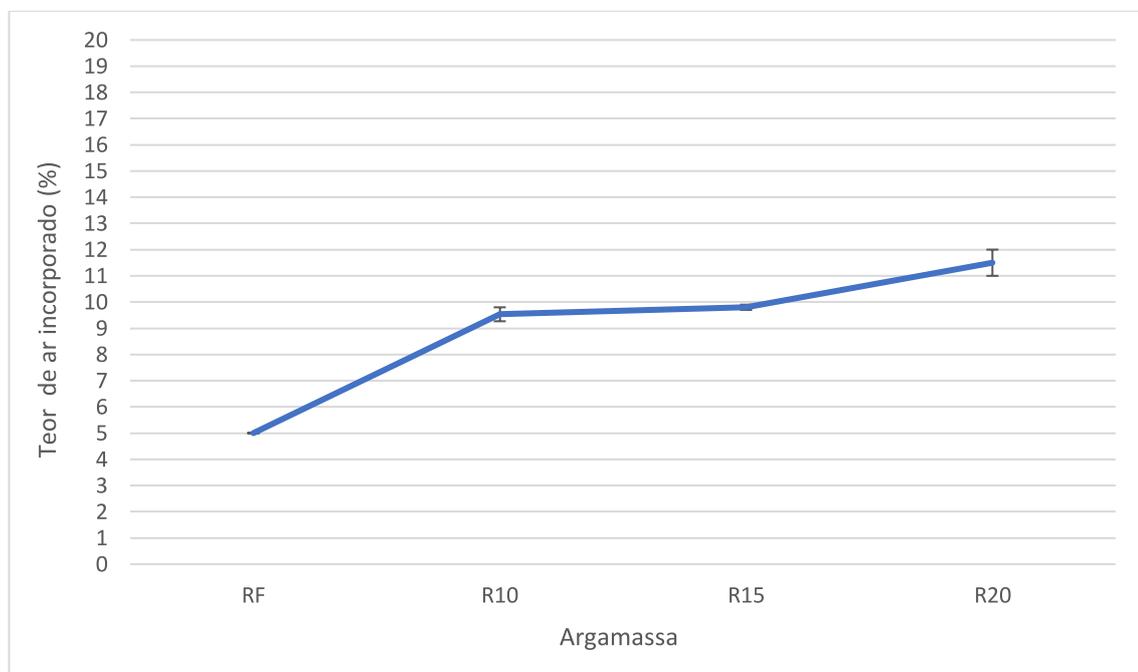
Os dados da tabela 18 e o gráfico 3 representam o teor de ar incorporado das argamassas fabricadas do presente trabalho.

Tabela 18 - Teor de ar incorporado

Traço	Teor de ar incorporado (%)
RF	5
R10	9,5
R15	9,8
R20	11,5

Fonte: Elaborada pelo autor

Gráfico 3 - Teor de ar incorporado



Fonte: Elaborada pelo autor

Através dos resultados apresentados na tabela 18, é possível observar o aumento do teor de ar incorporado nas argamassas com a substituição do cimento por resíduos de rochas ornamentais. O devido aumento pode estar associado ao acréscimo do teor de materiais finos, com alta área superficial específica, aumentando a necessidade de aditivo superplastificante para compensar a falta de água necessária, a fim de atingir a trabalhabilidade desejável e, desta forma, incorporar maiores quantidades de ar.

Conforme Santos (2008), outro fato que as adições minerais podem ocasionar é o aumento do teor de ar incorporado na mistura, pois os resíduos minerais possuem uma menor distribuição granulométrica, o que favorece o tamponamento dos poros, aprisionando maiores quantidade de ar na mistura. Ao comparar dois tipos de argamassas com diferentes tipos de substituições do cimento, constata-se que a argamassa com substituição do cimento por resíduo de polimento de porcelanato tende a ter um maior teor de ar incorporado do que a argamassa com a substituição do cimento por resíduo de pedreira de rocha calcária, graças ao resíduo de polimento possuir uma menor massa específica, o que gera um maior aprisionamento de ar na argamassa.

Conforme Yoshida e Barros (1995), o ar incorporado presente na argamassa tem a função de lubrificar os grãos sólidos presentes, melhorando a trabalhabilidade e a capacidade de retenção de água.

### 5.3 RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DA ARGAMASSA NO ESTADO ENDURECIDO

Nos presentes itens, são relatados os resultados e análises das propriedades das argamassas estudadas no presente trabalho no estado endurecido.

#### 5.3.1 Densidade de Massa

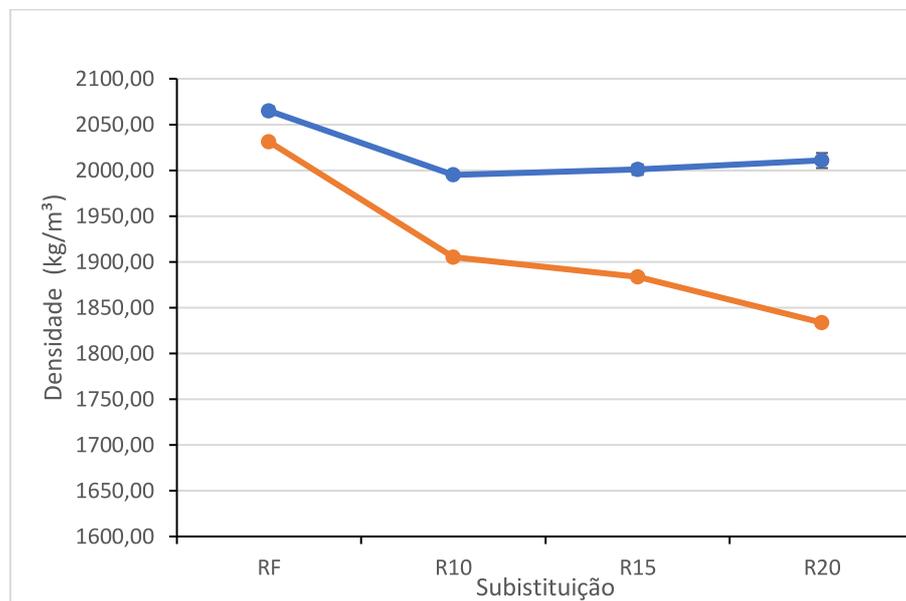
Os dados obtidos com as densidades de massa estão conformes a tabela 19 e o gráfico 4.

Tabela 19 - Densidade no estado endurecido

Traço	Densidade de massa (kg/m <sup>3</sup> )	Desvio padrão (kg/m <sup>3</sup> )	Densidade teórica (kg/m <sup>3</sup> )
RF	2064,95	4,81	2031,2
R10	1994,92	2,61	1905,0
R15	2000,71	5,73	1883,7
R20	2010,65	8,24	1833,5

Fonte: Elaborada pelo autor

Gráfico 4 - Densidade no estado endurecido



Fonte: Elaborada pelo autor

Para um melhor entendimento dos dados de densidade de massa no estado endurecido, foi necessário fazer uma densidade de massa teórica (calculada em função das quantidades de materiais utilizados em cada traço) e uma análise de variância (ANOVA), conforme a tabela 20.

Tabela 20 - Análise de Variância (ANOVA) e densidade de massa

Fonte da variação	ANOVA					
	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	9770,535871	3	3256,84529	26,17267778	4,74E-05	3,708265
Dentro dos grupos	1244,36839	10	124,436839			
Total	11014,90426	13				

Argamassas	F	Valor-P	F crítico	observação
REF- R10	163,7266209	0,000215	7,708647	Diferença significativa
REF- R15	58,31429686	0,000263	5,987378	Diferença significativa
REF- R20	32,40081597	0,004705	7,708647	Diferença significativa
R10- R15	0,54068224	0,489883	5,987378	Não significativa
R15- R20	1,043282272	0,346464	5,987378	Não significativa
R10- R20	3,311644882	0,142912	7,708647	Não significativa

Fonte: Elaborada pelo autor

O resultado da análise de variância demonstra que existe uma diferença significativa entre os resultados apresentados, pois o F maior do que o F crítico é o valor de  $P < 0,05$ .

Tanto o aumento do teor de ar incorporado quanto a baixa massa específica dos resíduos de rochas ornamentais exerceram influência sobre a diminuição de densidade de massa no estado endurecido. Conforme Nakakura e Cincotto (2004), a quantidade de ar incorporada na argamassa exerce influência significativa na densidade de massa, tanto no estado fresco quanto no endurecido, já que o ar possui uma menor densidade e ocupa uma fração da massa da argamassa.

Essa diminuição é comprovada tanto na densidade de massa teórica quanto na densidade de massa realizada nas argamassas produzidas. Através dos dados obtidos, nota-se a diminuição com a substituição do cimento por resíduos de rochas ornamentais. Por meio da densidade de massa calculada, constata-se que deveria ocorrer um pequeno aumento da densidade de massa com o aumento no teor de substituição, entretanto, a análise de variância relata que o aumento não foi significativo. Os resultados obtidos podem ser explicados: a substituição aumentou a compacidade do conjunto, pois, devido ao fato do resíduo de rocha ornamental ser um material mais fino, o mesmo ocupou os vazios deixados entre os grãos de areia e o cimento. Segundo Santos (2008), as argamassas produzidas com resíduos minerais tendem a reduzir sua densidade de massa, pois o resíduo possui uma baixa massa específica e, desta forma, há uma redução da massa específica da mistura quando substituído o cimento por resíduos minerais.

Estatisticamente, há diferenças significativas entre a argamassa referência e as argamassas com diferentes teores de substituição. Porém, na prática, todas

argamassas produzidas se adequam à mesma classe M6, conforme a figura 27 (segundo os requisitos para argamassa de assentamento e revestimento da NBR 13281 (ABNT, 2005e).

Figura 27 - Densidade de massa no estado endurecido NBR 13281 (ABNT, 2005e)

Classe	Densidade de massa no estado endurecido (kg/m <sup>3</sup> )	Método de ensaio
M1	≤ 1200	NBR 13280 (ABNT, 2005d)
M2	1000 a 1400	
M3	1200 a 1600	
M4	14000 a 1800	
M5	1600 a 2000	
M6	> 1800	

Fonte: NBR 13281 (ABNT, 2005e).

### 5.3.2 Módulo de Elasticidade

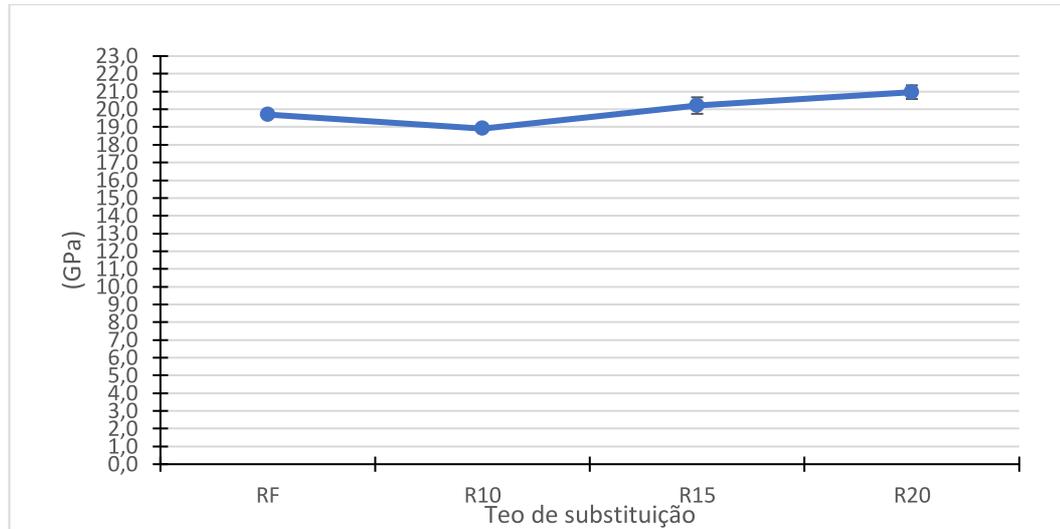
A tabela 21 e gráfico 5 mostram os resultados obtidos com o módulo de elasticidade das argamassas produzidas com 28 dias.

Tabela 21 - Módulo de elasticidade

Traço	Módulo de elasticidade (GPa)	Desvio padrão(GPa)
<b>RF</b>	19,71	0,05
<b>R10</b>	18,91	0,11
<b>R15</b>	20,21	0,47
<b>R20</b>	20,97	0,38

Fonte: Elaborada pelo autor

Gráfico 5 - Módulo de elasticidade



Fonte: Elaborada pelo autor

Foi realizada uma análise de variância (ANOVA) em todos os dados obtidos do módulo de elasticidade, conforme a tabela 22.

Tabela 22 - Análise de variância (ANOVA) do módulo de elasticidade

Fonte da variação	SQ	GI	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	6,838497068	3	2,279499	4,282969	0,034607	3,708265
Dentro dos grupos	5,322239827	10	0,532224			
<b>Total</b>	<b>12,16073689</b>	<b>13</b>				

Argamassas	F	Valor-P	F crítico	observação
<b>REF- R10</b>	42,65867	0,002839	7,708647	Diferença significativa
<b>REF- R15</b>	0,656701	0,448667	5,987378	Não significativa
<b>REF- R20</b>	10,60631	0,031177	7,708647	Diferença significativa
<b>R10- R15</b>	4,297496	0,083535	5,987378	Não significativa
<b>R15- R20</b>	1,226994	0,310411	5,987378	Não significativa
<b>R10- R20</b>	26,33905	0,006828	7,708647	Diferença significativa

Fonte: Elaborada pelo autor

Através dos dados obtidos, é possível observar, após uma queda inicial do módulo de elasticidade em relação à referência, um aumento dos módulos de elasticidade das argamassas que tiveram substituições do cimento por resíduos de

rochas ornamentais. Esse comportamento pode ser justificado com o aumento da compacidade do conjunto aglomerante e agregado, provocado pelo aumento do teor de finos provenientes dos resíduos de rochas ornamentais. Comportamento semelhante é observado na densidade de massa no estado endurecido, onde a velocidade da propagação das ondas ultrassônicas aumentou e o tempo de propagação da onda diminuiu. A diminuição do módulo de elasticidade no teor de 10% está coerente com o resultado obtido na densidade de massa no estado endurecido. Isso pode ser explicado pois, no teor de 10% de substituição, não há a quantidade suficiente de partículas para preencher os vazios deixados pela ausência de cimento relativa à substituição, o que faz com que o efeito físico do filler não seja superior ao efeito químico provocado pela retirada do cimento da argamassa.

### 5.3.3 Resistência à Compressão

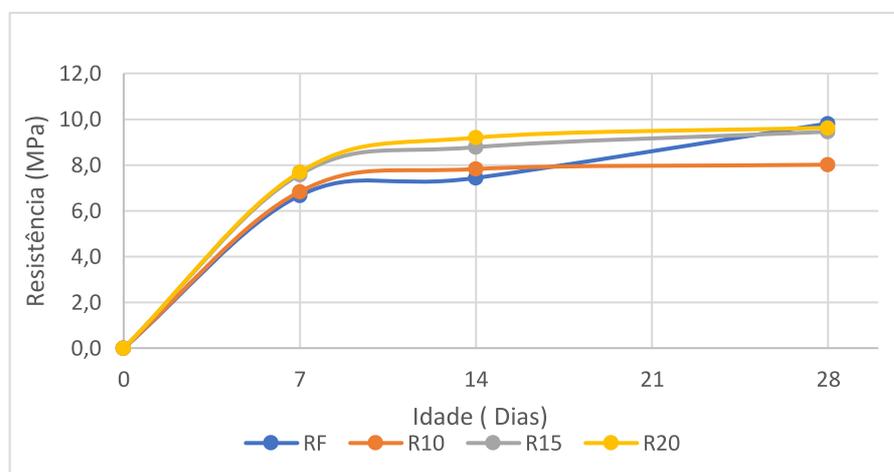
A tabela 23 e gráfico 6 mostram os resultados obtidos com a resistência a compressão das argamassas produzidas com 28 dias.

Tabela 23 - Resistência à compressão

Idade (Dias)	RF (MPa)	Desvio padrão (MPa)	R10 (MPa)	Desvio padrão (MPa)	R15 (MPa)	Desvio padrão (MPa)	R20 (MPa)	Desvio padrão (MPa)
7	6,67	0,11	6,84	0,10	7,58	0,12	7,69	0,19
14	7,43	0,09	7,82	0,17	8,78	0,14	9,19	0,15
28	9,81	0,15	8,01	0,13	9,45	0,11	9,63	0,19

Fonte: Elaborada pelo autor

Gráfico 6 - Resistência à compressão



Fonte: Elaborada pelo autor

Para uma melhor análise dos dados obtidos, foi necessário fazer uma análise de variância (ANOVA), conforme a tabela 24.

Tabela 24 - Análise de variância (ANOVA) e resistência à compressão

<b>ANOVA (7 DIAS)</b>						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	6,851059894	3	2,2836866	15,884775	1,95E-06	2,911334
Dentro dos grupos	4,456738346	31	0,1437658			
<b>Total</b>	<b>11,30779824</b>	<b>34</b>				
<b>ANOVA das argamassas entre si (7dias)</b>						
Argamassas	F	Valor-P	F crítico	observação		
REF- R10	1,1608283	0,298317	4,543077	Não significativa		
REF- R15	29,777818	2,05E-05	4,324794	Diferença significativa		
REF- R20	24,193519	0,000281	4,667193	Diferença significativa		
R10- R15	17,616287	0,000542	4,413873	Diferença significativa		
R15- R20	0,2038356	0,657702	4,493998	Não significativa		
R10- R20	18,963094	0,001433	4,964603	Diferença significativa		
<b>ANOVA (14 DIAS)</b>						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	17,44325672	3	5,814418907	42,85450113	5,78741E-11	2,922277191
Dentro dos grupos	4,070344132	30	0,135678138			
<b>Total</b>	<b>21,51360085</b>	<b>33</b>				
<b>ANOVA das argamassas entre si (14 DIAS)</b>						
Argamassas	F	Valor-P	F crítico	observação		
REF- R10	5,19400509	0,037720276	4,543077165	Diferença significativa		
REF- R15	71,799877	7,06E-08	4,38075	Diferença significativa		
REF- R20	144,0818008	2,04902E-09	4,493998478	Diferença significativa		
R10- R15	18,41208998	0,00074653	4,600109937	Diferença significativa		
R15- R20	4,507035651	0,050806617	4,543077165	Não significativa		
R10- R20	42,65170715	4,24502E-05	4,844335675	Diferença significativa		
<b>ANOVA (28 DIAS)</b>						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	21,54634	3	7,182112	27,92942695	2,36E-10	2,811543506
Dentro dos grupos	11,57185	45	0,257152			

<b>Total</b>				
	33,11818	48		
<b>ANOVA das argamassas entre si (28 DIAS)</b>				
<b>Argamassas</b>	<b>F</b>	<b>Valor-P</b>	<b>F crítico</b>	<b>observação</b>
<b>REF- R10</b>	74,32849052	2,43E-08	4,324793743	Diferença significativa
<b>REF- R15</b>	3,726003079	0,064547	4,225201273	Não significativa
<b>REF- R20</b>	0,584172311	0,452802	4,300949502	Não significativa
<b>R10- R15</b>	69,2575265	2,16E-08	4,279344309	Diferença significativa
<b>R15- R20</b>	0,743340115	0,397126	4,259677273	Não significativa
<b>R10- R20</b>	48,98452956	1,15E-06	4,380749692	Diferença significativa

Fonte: Elaborada pelo autor

Através da análise de variância, é possível observar que existem diferenças significativas entre os resultados estudados. Contudo, os resultados apresentados estão condizentes com os ensaios de densidade de massa e módulo de elasticidade.

Há um aumento da resistência a compressão constante à medida que se aumenta o teor de substituição. A argamassa referência até os 28 dias gera um aumento significativo da resistência à compressão, devido ao fato de possuir maior teor de aglomerante do que as argamassas com substituição. Os traços com substituições do cimento por resíduos de rochas ornamentais apresentam pouco aumento de resistência entre os 14 e 28 dias, tendo a maior parte do seu aumento ocorrido nas idades iniciais em comparação à referência.

O motivo do aumento da resistência à compressão nas argamassas com substituições pode ser devido ao efeito físico que os resíduos de rochas ornamentais geram nas argamassas produzidas, modificando a microestrutura das argamassas e diminuindo os espaços vazios entre as partículas. Desta forma, aos 28 dias as argamassas com 15% e 20% de substituições apresentaram estatisticamente resultados semelhantes aos da referência.

Conforme Silva, Campiteli e Gleize (2007), as propriedades mecânicas de uma argamassa podem ser explicadas pela densidade de massa no estado endurecido, tendo como influência o empacotamento granulométrico das partículas dos agregados miúdos, maior quantidade de materiais pulverulentos e menor consumo de água.

Conforme a classificação para argamassa de assentamento e revestimento da NBR 13281 (ABNT, 2005e)., aos 28 dias todas as argamassas produzidas do presente trabalho estão classificadas na mesma classe P6, conforme a figura 28.

Figura 28 - Resistência à compressão

Classe	Resistência à compressão (MPa)	Método de ensaio
P1	$\leq 2,0$	ABNT NBR 13279
P2	1,5 a 3,0	
P3	2,5 a 4,5	
P4	4,0 a 6,5	
P5	5,5 a 9,0	
P6	$> 8,0$	

Fonte: NBR 13281 (ABNT, 2005e).

Silva, Buest e Campiteli (2005) e Angelim, Angelim e Carasek (2003) verificam que a presença de finos nas argamassas trouxe diversos benefícios, aumentando a resistência mecânica nas argamassas produzidas, pois os finos ocuparam os espaços vazios deixados pelas partículas de maior diâmetro, melhorando o empacotamento entre as partículas e tornando-as mais compactas.

Conforme Santos *et al.* (2018), o aumento de resistência à compressão axial, obtido pela substituição do cimento por resíduos de mármore nas pastas estudadas, pode estar associado à melhor distribuição das partículas, tendo a fração mais fina completando a fração mais grossa, preenchendo os vazios e aumentando a densidade aparente das pastas.

A porosidade exerce diversas influências sobre as propriedades de uma matriz cimentícia. Conforme Isaias (2002) apud Arnold (2011), a permeabilidade é influenciada pela porosidade total e pela distribuição dos poros, contudo, apenas poros com valores específicos exercem contribuições significativas. Os poros podem ser classificados em dois grupos: poros capilares (ou macroporos), que apresentam diâmetros entre 50 nm e 10  $\mu\text{m}$ , e os poros gel (ou mesoporos), que apresentam diâmetros entre 2 nm e 50nm. Para Mehta e Monteiro (2008), os poros capilares influenciam a resistência à compressão e permeabilidade, e os poros de gel influenciam na retração.

### 5.3.4 Resistência à Tração

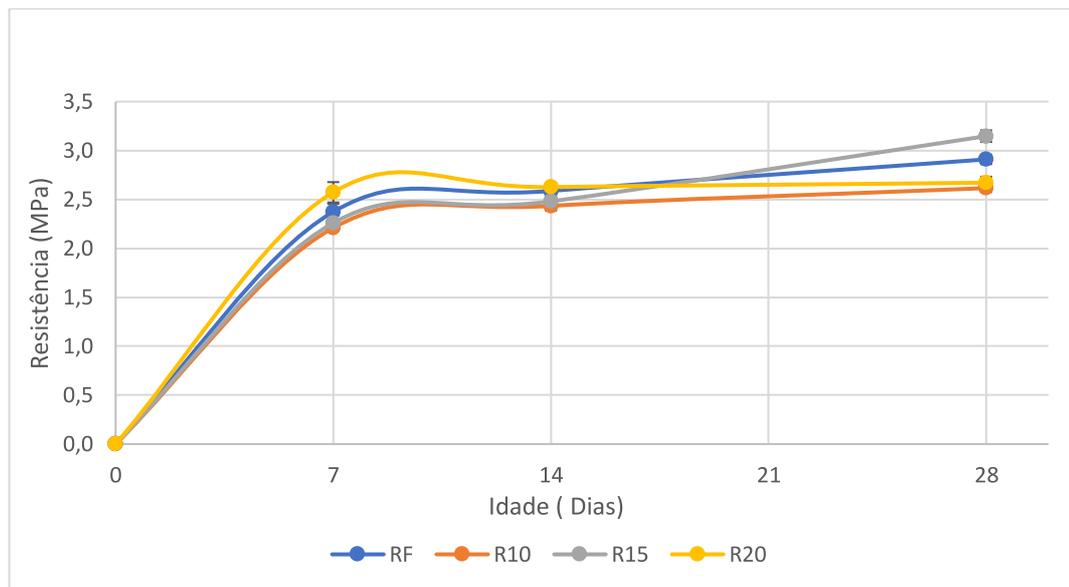
A tabela 25 e gráfico 7 representam os dados obtidos da resistência à tração das argamassas produzidas.

Tabela 25 - Resistência à tração

Idade (Dias)	RF (MPa)	Desvio padrão (MPa)	R10 (MPa)	Desvio padrão (MPa)	R15 (MPa)	Desvio padrão (MPa)	R20 (MPa)	Desvio padrão (MPa)
7	2,37	0,08	2,21	0,02	2,26	0,07	2,57	0,10
14	2,59	0,03	2,43	0,05	2,48	0,05	2,63	0,04
28	2,91	0,05	2,62	0,04	3,15	0,06	2,67	0,06

Fonte: Elaborada pelo autor

Gráfico 7 - Resistência à tração



Fonte: Elaborada pelo autor

Para uma melhor análise dos dados obtidos, necessitou-se fazer uma análise de variância (ANOVA), conforme a tabela 26.

Tabela 26 - Análise de variância (ANOVA) da resistência à tração

ANOVA (7 DIAS)						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,27571	3	0,091903	3,489542	0,044488	3,343889
Dentro dos grupos	0,368715	14	0,026337			
Total	0,644425	17				

ANOVA das argamassas entre si (7 DIAS )				
Argamassas	F	Valor-P	F crítico	observação
REF- R10	3,147093	0,119336	5,591448	Não significativa
REF- R15	1,043308	0,333723	5,117355	Não significativa
REF- R20	2,27555	0,18216	5,987378	Não significativa

<b>R10- R15</b>	0,313964	0,5906	5,317655	Não significativa
<b>R15- R20</b>	5,883408	0,045717	5,591448	Diferença significativa
<b>R10- R20</b>	16,73488	0,009439	6,607891	Diferença significativa

#### ANOVA (14 DIAS)

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
<b>Entre grupos</b>	0,169257	3	0,056419117	4,0599577	0,018773	3,027998
<b>Dentro dos grupos</b>	0,319619	23	0,013896479			
<b>Total</b>						
<b>Fonte da variação</b>	0,488876	26				

#### ANOVA das argamassas entre si (14dias)

Argamassas	F	Valor-P	F crítico	observação
<b>REF- R10</b>	6,0092189	0,026969	4,543077	Diferença significativa
<b>REF- R15</b>	4,0274757	0,072554	4,964603	Não significativa
<b>REF- R20</b>	0,6517608	0,438265	4,964603	Não significativa
<b>R10- R15</b>	0,3720846	0,552384	4,667193	Não significativa
<b>R15- R20</b>	5,3468038	0,04951	5,317655	Diferença significativa
<b>R10- R20</b>	6,7320483	0,022232	4,667193	Diferença significativa

#### ANOVA (28 DIAS)

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
<b>Entre grupos</b>	1,403343822	3	0,467781	17,86949279	7,67521E-07	2,922277
<b>Dentro dos grupos</b>	0,785329409	30	0,026178			
<b>Total</b>	2,188673231	33				

#### ANOVA das argamassas entre si (28 DIAS )

Argamassas	F	Valor-P	F crítico	observação
<b>REF- R10</b>	15,67664362	0,001124088	4,493998	Diferença significativa
<b>REF- R15</b>	9,908262976	0,005064821	4,351244	Diferença significativa
<b>REF- R20</b>	8,700821941	0,00941609	4,49400	Diferença significativa
<b>R10- R15</b>	40,33181679	1,79612E-05	4,60011	Diferença significativa
<b>R15- R20</b>	27,45279264	0,00012521	4,60011	Diferença significativa
<b>R10- R20</b>	0,560619726	0,47125491	4,964603	Não significativa

Fonte: Elaborada pelo autor

Através dos resultados obtidos com a análise de variância, é possível observar que aos 28 dias existe uma diferença significativa entre as argamassas produzidas, contudo, na prática essa diferença não é algo tão significativo. Conforme os requisitos de argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos da NBR 13281 (ABNT, 2005e)., todas as argamassas produzidas no presente trabalho estão inseridas na mesma classe R5, conforme a figura 29.

Figura 29 - Resistência à tração NBR 13281 (ABNT, 2005e).

Classe	Resistência à tração na flexão (MPa)	Método de ensaio
R1	$\leq 1,5$	NBR 13279 (ABNT, 2005c)
R2	1,0 a 2,0	
R3	1,5 a 2,7	
R4	2,0 a 3,5	
R5	2,7 a 4,5	
R6	$> 3,5$	

Fonte: NBR 13281 (ABNT, 2005e).

Através dos dados obtidos, todas as argamassas do presente trabalho apresentam bom desempenho e durabilidade segundo a classificação da NBR 13281 (ABNT, 2005e), pois as argamassas estavam nas faixas mais altas da tabela.

Os resultados obtidos na resistência à tração na flexão estão coerentes com os resultados obtidos na resistência à compressão, na qual todas as argamassas estão na mesma classe. Os resultados obtidos demonstram que a influência do efeito físico promovido pela substituição do cimento por resíduos de rochas ornamentais melhora o empacotamento entre as partículas, tornando-a mais coesa e densa, o que faz com que as argamassas com substituição de cimento demonstrem resultados semelhantes com os menores teores de aglomerantes do que as argamassas referências.

Calmon *et al.* (1997), ao substituírem a cal por resíduo de rocha ornamental, verificaram que há uma tendência do aumento da resistência à tração por compressão diametral com o aumento de substituição. Os resultados obtidos de resistência à tração foram coerentes com os resultados de resistência à compressão axial, absorção, índice de vazios e massa específica.

Matta *et al.* (2013) observam um aumento da resistência à tração na flexão ao adicionarem resíduos de rochas ornamentais nas argamassas fabricadas. Resultados semelhantes foram constatados na resistência à compressão axial. Aos 63 dias, as resistências médias contendo resíduos de rochas ornamentais foram maiores em 12,1% do que as argamassas referências.

Para Gonçalves (2000), pequenas adições em até 20% de resíduos de rochas ornamentais em uma argamassa não alteram a resistência à tração na flexão, contudo, melhoram o empacotamento entre as partículas.

Segundo Silva (2017), ao aumentar a quantidade de materiais pulverulentos com a substituição parcial da areia por resíduos de rochas ornamentais nas argamassas produzidas, verifica-se o aumento da resistência na flexão, e comportamento semelhante há na resistência a compressão. A substituição melhora o empacotamento entre os grãos, preenchendo os vazios que existem nas argamassas.

Já Santos (2008) verificou que a substituição parcial de cimento por resíduos minerais diminui a resistência à tração na flexão e à compressão em todas argamassas produzidas, ou seja, a substituição comprometeu seu desempenho.

Conforme (SILVA (2006); NAKAKURA e CINCOTTO (2004)), as argamassas de revestimento estão mais relacionadas à resistência à tração do que a resistência à compressão. Desta forma, uma baixa tração na flexão pode ocasionar patologias no revestimento, já que o revestimento não consegue suportar as tensões submetidas.

### 5.3.5 Variação Dimensional e Variação de Massa

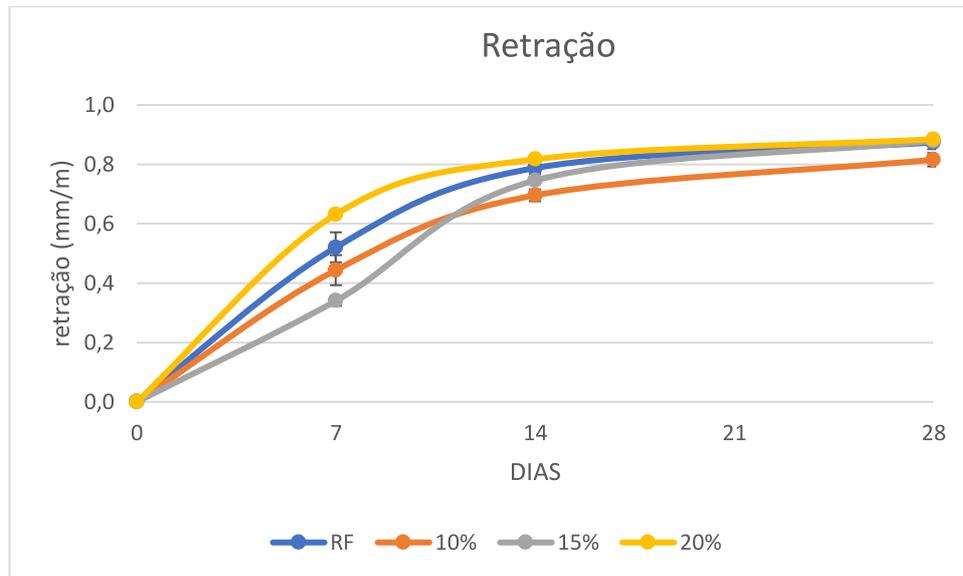
A tabela 27 e o gráfico 8 representam os dados obtidos na variação dimensional das argamassas produzidas.

Tabela 27 - Variação dimensional

Variação dimensional								
Idades (Dias)	RF (mm/m)	Desvio padrão (mm/m)	R10 (mm/m)	Desvio padrão (mm/m)	R15 (mm/m)	Desvio padrão (mm/m)	R20 (mm/m)	Desvio padrão (mm/m)
7	0,52	0,03	0,44	0,05	0,34	0,02	0,63	0,01
14	0,79	0,04	0,70	0,02	0,75	0,01	0,82	0,01
28	0,87	0,04	0,82	0,02	0,88	0,01	0,88	0,01

Fonte: Elaborada pelo autor

Gráfico 8 - Variação dimensional



Fonte: Elaborada pelo autor

Para a melhor interpretação dos dados de variação volumétrica, foi necessária análise de variância (ANOVA) nas idades 7, 14 e 28 dias, conforme a tabela 28.

Tabela 28 - Análise de variância (ANOVA) da variação dimensional

ANOVA (7 DIAS)						
Fonte da variação	SQ	GI	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,267755644	3	0,089252	27,67226	9,08E-07	3,1967768
Dentro dos grupos	0,05483043	17	0,003225			
Total	0,322586074	20				

ANOVA das argamassas entre si (7 DIAS)				
Argamassas	F	Valor-P	F crítico	observação
REF- R10	2,03124864	0,19712	5,591448	Não significativa
REF- R15	34,5018058	0,000237	5,117355	Diferença significativa
REF- R20	19,500483	0,001681	5,117355	Diferença significativa
R10- R15	5,21158057	0,051837	5,317655	Não significativa
R15- R20	265,71859	1,55E-08	4,964603	Diferença significativa
R10- R20	21,39361	0,001698	5,317655	Diferença significativa

ANOVA (14 DIAS)						
Fonte da variação	SQ	GI	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,040134	3	0,013378	5,010383	0,011395	3,19677
Dentro dos grupos	0,04539	17	0,00267			
Total	0,085524	20				

<b>ANOVA das argamassas entre si (14 DIAS )</b>						
Argamassas	F	Valor-P	F crítico	observação		
REF- R10	3,37507	0,108801	5,591448	Não significativa		
REF- R15	1,184652	0,304697	5,11735503	Não significativa		
REF- R20	0,553581	0,475834	5,11735503	Não significativa		
R10- R15	6,819628	0,031061	5,31765507	Diferença significativa		
R15- R20	23,30717	0,000694	4,964603	Diferença significativa		
R10- R20	31,36394	0,00051	5,31765507	Diferença significativa		
<b>ANOVA (28 DIAS)</b>						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,013585	3	0,004528	1,574052	0,232368	3,196777
Dentro dos grupos	0,048905	17	0,002877			
<b>Total</b>	0,06249	20				

Fonte: Elaborada pelo autor

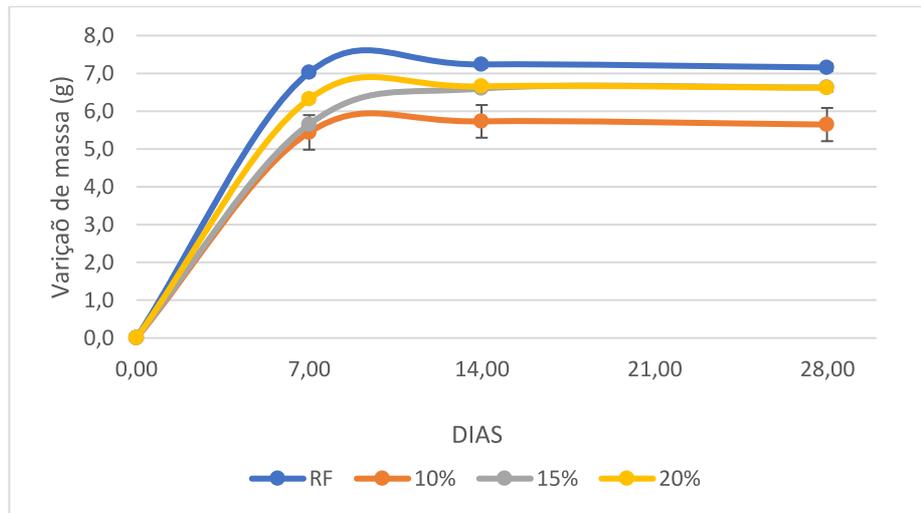
A tabela 29 e o gráfico 9 representam os dados obtidos quanto à variação de massa.

Tabela 29 - Variação de massa

Variação de massa								
Idades (Dias)	RF (g)	Desvio padrão (g)	R10 (g)	Desvio padrão (g)	R15 (g)	Desvio padrão (g)	R20 (g)	Desvio padrão (g)
7	7,02	0,09	5,44	0,46	5,65	0,07	6,32	0,08
14	7,24	0,10	5,73	0,43	6,60	0,02	6,65	0,09
28	7,16	0,10	5,65	0,44	6,63	0,02	6,62	0,10

Fonte: Elaborada pelo autor

Gráfico 9 - Variação de massa



Fonte: Elaborada pelo autor

Os dados de variação de massa foram analisados através da análise de variância, conforme a tabela 30.

Tabela 30 - Análise variância (ANOVA) da variação de massa

ANOVA (7 DIAS)						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	7,450388	3	2,483463	13,8966	7,88E-05	3,196777
Dentro dos grupos	3,038071	17	0,17871			
<b>Total</b>	<b>10,48846</b>	<b>20</b>				

ANOVA das argamassas entre si (7 DIAS)				
Argamassas	F	Valor-P	F crítico	observação
REF- R10	14,52187	0,006621	5,591448	Diferença significativa
REF- R15	137,3576	9,41E-07	5,117355	Diferença significativa
REF- R20	33,43967	0,000265	5,117355	Diferença significativa
R10- R15	0,327212	0,583017	5,317655	Não significativa
R15- R20	36,91492	0,000119	4,964603	Diferença significativa
R10- R20	5,513612	0,046819	5,317655	Diferença significativa

ANOVA (14 DIAS)						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	5,061875	3	1,6872918	10,59655	0,000365	3,196777
Dentro dos grupos	2,706915	17	0,1592303			
<b>Total</b>	<b>7,76879</b>	<b>20</b>				

<b>ANOVA das argamassas entre si (14 DIAS)</b>				
<b>Argamassas</b>	<b>F</b>	<b>Valor-P</b>	<b>F crítico</b>	<b>observação</b>
<b>REF- R10</b>	14,53026	0,006612	5,591448	Diferença significativa
<b>REF- R15</b>	50,05636	5,82E-05	5,117355	Diferença significativa
<b>REF- R20</b>	18,54191	0,001973	5,117355	Diferença significativa
<b>R10- R15</b>	6,38156	0,035466	5,317655	Diferença significativa
<b>R15- R20</b>	0,348594	0,568012	4,964603	Não significativa
<b>R10- R20</b>	6,536432	0,033823	5,317655	Diferença significativa

<b>ANOVA (28 DIAS)</b>						
<b>Fonte da variação</b>	<b>SQ</b>	<b>gl</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>	<b>valor-P</b>	<b>F crítico</b>
<b>Entre grupos</b>	5,158068201	3	1,719356067	10,4248	0,000399	3,196777
<b>Dentro dos grupos</b>	2,803792421	17	0,164928966			
<b>Total</b>	7,961860622	20				

<b>ANOVA das argamassas entre si (28 dias)</b>				
<b>Argamassas</b>	<b>F</b>	<b>Valor-P</b>	<b>F crítico</b>	<b>observação</b>
<b>REF- R10</b>	14,08382033	0,007142	5,591448	Diferença significativa
<b>REF- R15</b>	33,05955134	0,000276	5,117355	Diferença significativa
<b>REF- R20</b>	14,95294929	0,003807	5,117355	Diferença significativa
<b>R10- R15</b>	7,947799894	0,022522	5,317655	Diferença significativa
<b>R15- R20</b>	0,013311517	0,910431	4,964603	Não significativa
<b>R10- R20</b>	6,95813347	0,029814	5,317655	Diferença significativa

Fonte: Elaborada pelo autor

Através da análise de variância é possível observar que há uma diferença significativa na variação de massa entre a argamassa referência e as argamassas com substituições. Os resultados obtidos com a variação de massa não estão refletindo comportamento semelhante com a variação volumétrica, pois, apesar do aumento do teor de substituição aumentar a variação de massa por perder maiores quantidades de água, a variação volumétrica das argamassas produzidas não foi alterada. Assim, observa-se que aos 28 dias não houve o aumento de retração das argamassas, e os resíduos de rochas ornamentais não influenciaram a retração das argamassas de revestimento.

Conforme Barbosa (2005), o efeito físico de retração está relacionado à deformação na estrutura da pasta hidratada, provocada por diversos fenômenos que interferem na deformação total externa dos componentes cimentícios. As retrações ocorrem de diversas formas, contudo, uma parte da retração ocorre nas primeiras idades da fabricação das argamassas e está diretamente relacionada às reações internas da pasta de cimento.

A retração é a combinação do endurecimento e a diminuição de volume decorrente da perda de água por evaporação ou pelas reações de hidratação. (FIORITO, 2009). O mecanismo de retração de uma argamassa é proveniente da variação de volume, e decorre da remoção da água por forças superficiais, água absorvida e a água retida entre as superfícies dos cristais no processo de secagem (Cincotto *et al.*, (1995) apud Apolinário (2014).

Para Peña (2004), o processo de retração é influenciado pela composição da mistura e as condições de exposição pelas quais a matriz está sujeita.

Conforme Li *et al.* (2018), ao substituir o cimento por um filer sem propriedades pozolânicas, verifica-se que a substituição tem efeito significativo tanto na durabilidade da argamassa quanto na estabilidade dimensional.

A substituição pode ter modificado a microestrutura das argamassas produzidas, melhorando o empacotamento granulométrico. Apesar de perder maiores quantidades de água, há, dessa forma, a mesma retração da argamassa referência.

O aumento de variação de massa na argamassa referência pode ser devido à necessidade de maiores quantidades de água para reagir quimicamente com o cimento.

### 5.3.6 Resistência de Aderência à Tração

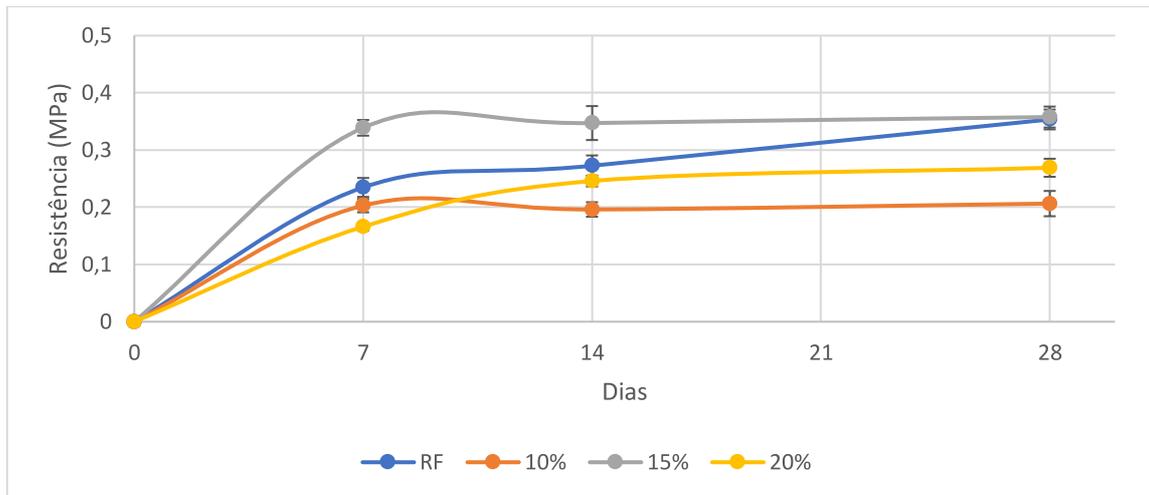
A tabela 31 e o gráfico 10 demonstram os dados obtidos com o ensaio de aderência à tração nas argamassas produzidas nas idades 7, 14 e 28 dias.

Tabela 31 - Resistência de aderência à tração

Idade (Dias)	RF (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Resistência à aderência					
			R10 (MPa)	Desvio padrão (MPa)	R15 (MPa)	Desvio padrão (MPa)	R20 (MPa)	Desvio padrão (MPa)
7	0,23	0,02	0,20	0,01	0,34	0,01	0,17	0,01
14	0,27	0,02	0,20	0,01	0,35	0,03	0,25	0,01
28	0,35	0,02	0,21	0,02	0,36	0,02	0,27	0,02

Fonte: Elaborada pelo autor

Gráfico 10 - Resistência de aderência à tração



Fonte: Elaborada pelo autor

Devido ao ensaio de resistência à aderência ter inúmeras variáveis que podem influenciar os seus resultados, entre elas preparação da superfície e formas de rupturas, foi necessário fazer uma análise de variância nos dados obtidos, conforme pode ser visto na tabela 32.

Tabela 32 - Análise de variância (ANOVA) e resistência de aderência à tração

ANOVA (7 dias)						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,184954824	3	0,061651608	37,85079307	1,684E-11	2,85174134
Dentro dos grupos	0,061894637	38	0,001628806			
<b>Total</b>	<b>0,246849462</b>	<b>41</b>				

ANOVA das argamassas entre si (7dias)

Argamassas	F	Valor-P	F crítico	Observação
REF- R10	2,364156509	0,1425549	4,45132177	Não significativa
REF- R15	23,78219165	0,0001048	4,38074969	Diferença significativa
REF- R20	16,46840331	0,0006141	4,3512435	Diferença significativa
R10- R15	53,70936932	8,342E-07	4,41387342	Diferença significativa
R15- R20	130,9429153	1,74E-10	4,32479374	Diferença significativa
R10- R20	8,056898715	0,0105039	4,38074969	Não significativa

ANOVA (14 dias)

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Entre grupos	0,094166867	3	0,03138896	12,4782861	9,56E-06	2,866266

<b>Dentro dos grupos</b>	0,090557501	36	0,00251549			
<b>Total</b>	0,184724368	39				
<b>Fonte da variação</b>	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
<b>ANOVA das argamassas entre si (14dias)</b>						
<b>Argamassas</b>	F	Valor-P	F crítico	Observação		
<b>REF- R10</b>	12,0782953	0,003122	4,493998	Diferença significativa		
<b>REF- R15</b>	5,10080	0,04040	4,60011	Diferença significativa		
<b>REF- R20</b>	2,09203899	0,162166	4,30095	Não significativa		
<b>R10- R15</b>	25,9359108	0,000164	4,60011	Diferença significativa		
<b>R15- R20</b>	17,5578583	0,000451	4,351244	Diferença significativa		
<b>R10- R20</b>	10,0599524	0,004416	4,30095	Diferença significativa		
<b>ANOVA (28 dias )</b>						
<b>Fonte da variação</b>	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
<b>Entre grupos</b>	0,11923	3	0,03974214	11,63668335	1,93E-05	2,874187484
<b>Dentro dos grupos</b>	0,11953	35	0,00341525			
<b>Total</b>	0,23876	38				
<b>ANOVA das argamassas entre si (28 dias )</b>						
<b>Argamassas</b>	F	Valor-P	F crítico	Observação		
<b>REF- R10</b>	23,21919186	0,000226	4,543077165	Diferença significativa		
<b>REF- R15</b>	0,027887017	0,868834	4,279344309	Não significativa		
<b>REF- R20</b>	12,12400347	0,002495	4,380749692	Diferença significativa		
<b>R10- R15</b>	21,26184377	0,000289	4,493998478	Diferença significativa		
<b>R15- R20</b>	11,88550646	0,002546	4,351243503	Diferença significativa		
<b>R10- R20</b>	5,470786935	0,037456	4,747225347	Diferença significativa		

Fonte: Elaborada pelo autor

Através da análise de variância é possível observar que as argamassas com 15% de substituição (R15) obtiveram resultados maiores de resistência à aderência desde os 7 dias de idade em relação às argamassas R10 e R20. Demonstrando que substituir 15% do cimento por resíduos de rochas ornamentais favorece a melhor ancoragem em comparação às substituições de 10% e 20%. Valores acima de 15% tendem a diminuir a capacidade mecânica das argamassas, o que pode ser devido à quantidade de pasta, que não foi suficiente para envolver todos os grãos constituintes da argamassa, favorecendo a diminuição da resistência à aderência. Em substituições

menores que 15%, a diminuição da resistência à aderência pode ser devido ao efeito físico, que não foi superior ao afeito químico.

Conforme a NBR 13281 (ABNT, 2005e)., as argamassas produzidas pertencem às seguintes classes, conforme o quadro 5.

Quadro 5 - Resistência potencial de aderência à tração

Argamassa	Classe
R10 R20	A2 ( $\geq 0,20$ )
RF R15	A3 ( $\geq 0,30$ )

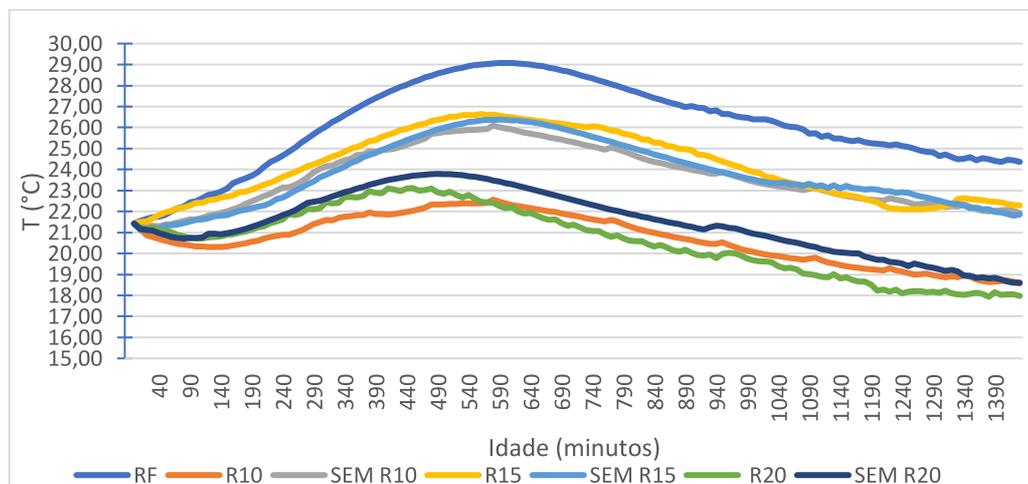
Fonte: NBR 13281 (ABNT, 2005e).

Nobrega *et al.* (2014) observaram uma diminuição gradual da resistência à aderência após a substituição de 20%.

### 5.3.7 Calorimetria

O gráfico 11 mostra a evolução de calor da hidratação inicial das argamassas durante 24 horas.

Gráfico 11 - Evolução do calor de hidratação das argamassas



Fonte: Elaborada pelo autor

Os dados da evolução de calor das argamassas produzidas foram analisados através da análise de variância (ANOVA), conforme a tabela 33.

Tabela 33 - análise de variância (ANOVA) da calorimetria

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
<b>Entre grupos</b>	3638,52933	6	606,421555	239,3808741	1,6326E189	2,107622208
<b>Dentro dos grupos</b>	2535,82488	1001	2,53329159			
<b>Total</b>	6174,35421	1007				

Argamassas	F	Valor-P	F crítico	Observação
<b>REF- R10</b>	734,5378	5,52055E-81	3,874178339	Diferença significativa
<b>REF- SEM R10</b>	134,3187	1,01514E-25	3,874178339	Diferença significativa
<b>REF- R15</b>	78,47329	8,7834E-17	3,874178339	Diferença significativa
<b>REF- SEM R15</b>	112,3251	2,34885E-22	3,874178339	Diferença significativa
<b>REF-R20</b>	621,7035	1,06959E-73	3,874178339	Diferença significativa
<b>REF-SEM R20</b>	473,0057	1,44697E-62	3,874178339	Diferença significativa
<b>R10- SEM R10</b>	368,4716	2,42612E-53	3,874178339	Diferença significativa
<b>R15- SEM R15</b>	3,560517	0,060181994	3,874178339	Não significativa
<b>R20- SEM R20</b>	21,12216	6,4723E-06	3,874178339	Diferença significativa

Fonte: Elaborada pelo autor

Através dos resultados obtidos pela análise de variância, é possível observar que, ao substituir o cimento por resíduos de rochas ornamentais nas argamassas estudadas, o calor de hidratação das argamassas não aumentou nas primeiras horas. Desta forma, os resíduos não afetaram a formação dos produtos de hidratação do cimento, indicando que o resíduo não atua como ponto de nucleação, mas sim, apenas com o efeito físico de filler.

Resultados semelhantes foram encontrados por (SANTOS *et al.*, (2018); VARDHAN *et al.* (2015)). Os mesmos, ao utilizarem DRX nas amostras de argamassas com resíduos de mármore, verificaram que a adição de resíduo de mármore nas pastas não gera mudanças nas intensidades relativas dos picos das fases hidratadas do cimento. Com a adição, não há a formação de produtos de interação do resíduo com o cimento, demonstrando que o resíduo não atua quimicamente, pois é um material inerte.

As pesquisadoras Uliana (2013) e Soares (2014) utilizaram resíduos de rochas ornamentais em argamassa com cal e com cimento, e verificaram que o resíduo não

possui atividade pozolânica. O mesmo apenas atua através do efeito físico de preenchimento dos vazios e densificação da mistura, e não se enquadra nos requisitos da NBR 12653 (ABNT, 2014). Conforme a NBR 12653 (ABNT, 2014), um material pozolânico pode reagir com o hidróxido de cálcio para formação de materiais cimentastes na presença de umidade e temperatura ambiente.

### 5.3.7 Absorção de Água por Imersão e Índice de Vazios

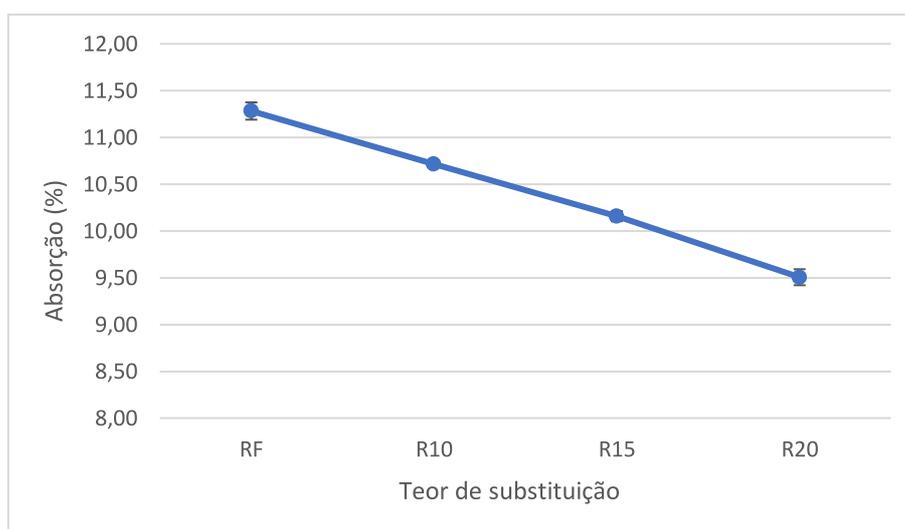
A tabela 34 e o gráfico 12 representam os dados obtidos da absorção de água por imersão das argamassas produzidas.

Tabela 34 - Absorção de água por imersão

Traço	Absorção (%)	Desvio padrão (%)
RF	11,28	0,09
R10	10,71	0,03
R15	10,16	0,05
R20	9,51	0,09

Fonte: Elaborada pelo autor

Gráfico 12- Absorção de água por imersão



Fonte: Elaborada pelo autor

Foi realizada uma análise de variância (ANOVA) em todos os dados obtidos de absorção de água por imersão, conforma a tabela 35.

Tabela 35 - Análise de variância (ANOVA) da absorção de água por imersão

Fonte da variação	SQ	GI	MQ	F	valor-P	F crítico
<b>Entre grupos</b>	5,199824	3	1,733275	117,189	5,98E-07	4,066181
<b>Dentro dos grupos</b>	0,118323	8	0,01479			
<b>Total</b>	5,318148	11				
<b>Argamassas</b>	F	Valor-P	F crítico		observação	
<b>REF- R10</b>	34,09458	0,004288	7,708647		Diferença significativa	
<b>REF- R15</b>	110,3708	0,000464	7,708647		Diferença significativa	
<b>REF- R20</b>	198,7227	0,000147	7,708647		Diferença significativa	
<b>R10- R15</b>	80,11697	0,000862	7,708647		Diferença significativa	
<b>R15- R20</b>	41,6202	0,002972	7,708647		Diferença significativa	
<b>R10- R20</b>	176,1021	0,000186	7,708647		Diferença significativa	

Fonte: Elaborada pelo autor

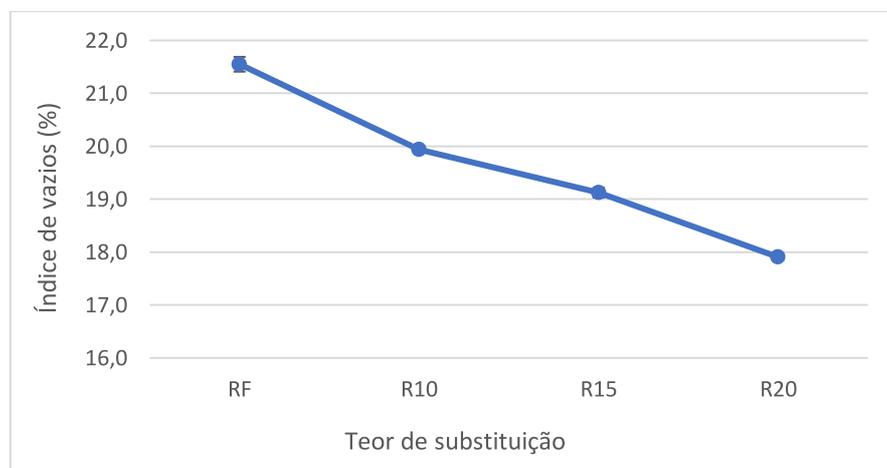
Os dados obtidos com o índice de vazios então conforme a tabela 36 e o gráfico 13.

Tabela 36 - Índice de vazios

Traço	Índice de vazios (%)	Desvio padrão (%)
RF	21,55	0,14
R10	19,94	0,05
R15	19,13	0,09
R20	17,91	0,05

Fonte: Elaborada pelo autor

Gráfico 13 - Índice de vazios



Fonte: Elaborada pelo autor

Todos os dados dos índices de vazios das argamassas produzidas foram analisados através da análise de variância (ANOVA), conforme a tabela 37.

Tabela 37 - Análise de variância (ANOVA) do índice de vazio

Fonte da variação	SQ	GI	MQ	F	valor-P	F crítico
<b>Entre grupos</b>	21,03962	3	7,013205	277,2905	2,02E-08	4,066181
<b>Dentro dos grupos</b>	0,202335	8	0,025292			
<b>Total</b>	21,24195	11				
<b>Argamassas</b>	F	Valor-P	F crítico	Observação		
<b>REF- R10</b>	117,3419	0,000412	7,708647	Diferença significativa		
<b>REF- R15</b>	208,2871	0,000134	7,708647	Diferença significativa		
<b>REF- R20</b>	598,6385	1,66E-05	7,708647	Diferença significativa		
<b>R10- R15</b>	57,88514	0,001602	7,708647	Diferença significativa		
<b>R15- R20</b>	127,2558	0,000352	7,708647	Diferença significativa		
<b>R10- R20</b>	755,5573	1,04E-05	7,708647	Diferença significativa		

Fonte: Elaborada pelo autor

Através da análise de variância (ANOVA), é possível verificar que existem diferenças significativas entre os resultados obtidos da absorção de água por imersão e do índice de vazios. Os resultados alcançados estão coerentes com os resultados de densidade de massa e módulo de elasticidade, demonstrando que, ao substituir o cimento por resíduos de rochas ornamentais, há um melhor empacotamento entre os grãos, tendo a fração mais fina completando a fração mais grossa, preenchendo os vazios e tornando a microestrutura das argamassas mais densas e coesas. Desta forma, quanto maior o teor de finos menor é a absorção de água e o índice de vazios.

Conforme Freitas (2010), o maior teor de finos na argamassa proporcionou a diminuição dos raios capilares (devido ao melhor empacotamento granulométrico) e, conseqüentemente, obteve menores índices de vazios.

Segundo Apolinário (2014), a menor quantidade de poros, aumenta a densidade da argamassa, o que resulta em uma maior resistência mecânica.

### 5.3.8 Absorção de Água por Capilaridade e Coeficiente de Capilaridade

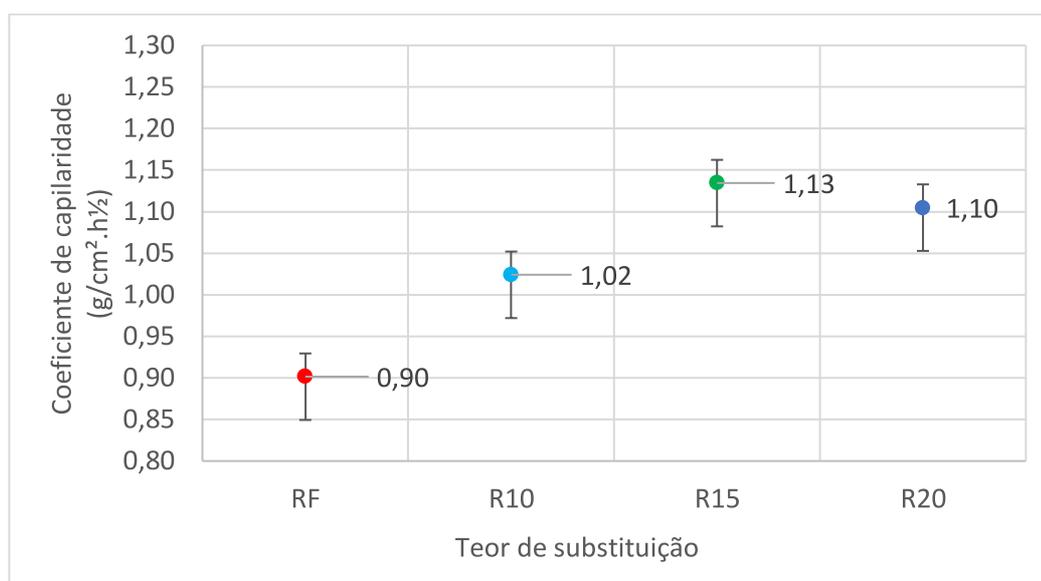
A tabela 38 e gráfico 14 mostram os resultados obtidos dos coeficientes de capilaridade das argamassas produzidas.

Tabela 38 - Coeficiente de capilaridade

Traço	C. de capilaridade (g/cm <sup>2</sup> .h <sup>1/2</sup> )	Desvio (g/cm <sup>2</sup> .h <sup>1/2</sup> )	
		Positivo	Negativo
RF	0,9	0,017	0,015
R10	1,02	0,026	0,025
R15	1,13	0,025	0,043
R20	1,10	0,028	0,052

Fonte: Elaborada pelo autor

Gráfico 14 - Coeficiente de capilaridade



Fonte: Elaborada pelo autor

Os dados obtidos dos coeficientes de capilaridade das argamassas produzidas foram analisados através da análise de variância, conforme a tabela 39.

Tabela 39 - Análise de variância (ANOVA) do coeficiente de capilaridade

Fonte da variação	SQ	GI	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,109400933	3	0,036467	45,11593	1,8E-06	3,587434
Dentro dos grupos	0,008891244	11	0,000808			
<b>Total</b>	<b>0,118292177</b>	<b>14</b>				
<b>Argamassas</b>	<b>F</b>	<b>Valor-P</b>	<b>F crítico</b>	<b>observação</b>		

<b>REF- R10</b>	53,05709	0,000763	6,607891	Diferença significativa
<b>REF- R15</b>	146,7643	6,77E-05	6,607891	Diferença significativa
<b>REF- R20</b>	81,93075	0,000275	6,607891	Diferença significativa
<b>R10- R15</b>	32,01724	0,001309	5,987378	Diferença significativa
<b>R15- R20</b>	1,617473	0,250514	5,987378	Não significativa
<b>R10- R20</b>	13,69693	0,010077	5,987378	Diferença significativa

Fonte: Elaborada pelo autor

Através dos resultados obtidos é verificado que existe uma diferença significativa entre a argamassa referência e as argamassas com teores de substituições. Os resultados obtidos dos coeficientes de capilaridade estão coerentes com os resultados alcançados na absorção de água por imersão e índice de vazios. O aumento do teor finos melhorou a microestrutura das argamassas, diminuindo o índice de vazios e os poros capilares. Desta forma, há uma redução dos diâmetros dos poros e, conseqüentemente, uma maior taxa de absorção de água por capilaridade.

Conforme Silva (2006) e Matta *et al.* (2013), o maior teor de partículas finas na argamassa pode diminuir o diâmetro dos poros capilares, aumentando a taxa de absorção de água por capilaridade. Assim, quanto menor o diâmetro dos poros capilares, maior é a altura de água atingida no corpo de prova. A altura de penetração é inversamente proporcional ao diâmetro dos poros. (SANTOS, 2008).

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após a verificação da influência da substituição parcial do cimento por resíduos de rochas ornamentais nos teores de 10%, 15% e 20%, nas propriedades de uma argamassa de revestimento, concluiu-se que:

- a) No estado fresco, a menor massa específica e a alta área superficial dos resíduos de rochas ornamentais influenciam na trabalhabilidade das argamassas produzidas. Há a necessidade de maiores teores de aditivo com o aumento do teor de substituição. O aumento do teor de aditivo influencia o aumento do teor de ar incorporado nas argamassas. Contudo, os resultados demonstram que a substituição não modificou as propriedades de densidade de massa no estado fresco e na retenção de água. A alta retenção de todas as argamassas produzidas pode estar relacionada ao elevado teor de cal nas argamassas.
- b) No estado endurecido, o efeito filler dos resíduos de rochas ornamentais atua nas propriedades das argamassas de revestimento. Há um pequeno aumento na densidade de massa, devido ao fato de o resíduo aumentar a compacidade do conjunto e ocupar os vazios deixados entre os grãos de areia e cimento, contudo, todas as argamassas estão na mesma classe. Resultados semelhantes são observados no módulo de elasticidade. Há o aumento do módulo com o aumento do teor de substituição, apesar do resíduo apresentar uma massa específica menor do que o cimento, resulta em um maior empacotamento e maior densidade de massa. Na resistência à compressão, a ausência de cimento também é compensada pelo melhor empacotamento dos grãos. Desta forma, as argamassas com substituições alcançam valores semelhantes ao traço referência, assim, todas as argamassas foram classificadas na mesma classe P6. Resultados semelhantes são observados na resistência à tração. O efeito físico da substituição do cimento por resíduos de rochas ornamentais faz com que as argamassas com substituições fiquem com resistência à tração similar à argamassa referência. Desta forma, aos 28 dias, todas as argamassas ficaram na mesma classe R5, conforme a NBR 13281 (ABNT, 2005e). Ao observar as retrações das argamassas com substituições, é possível

verificar que aos 28 dias a substituição não aumenta a retração em relação à referência (apesar das argamassas com substituições terem aumentado a variação de massa, devido à maior perda de água). O aumento do teor de finos melhorou a microestrutura das argamassas, diminuindo a absorção de água por imersão e, conseqüentemente, diminuindo o índice de vazios. Devido, a diminuição dos diâmetros dos poros aumentou o coeficiente de capilaridade.

- c) Os resíduos de rochas ornamentais são um material inerte. Não há alteração da temperatura de hidratação quando substituído o cimento, portanto, sua atuação nas argamassas é através do efeito físico, graças aos resíduos possuírem uma menor granulometria do que o cimento, o que aumenta a compacidade do conjunto aglomerante/agregado.
- d) Quando utilizada como revestimento, a substituição influencia a resistência à tração na aderência. Entre as argamassas produzidas com substituições, apenas a argamassa com 15% de substituição apresenta resultados semelhantes à argamassa referência. Ambas as argamassas pertencem à mesma classe A3, conforme NBR 13281 (ABNT, 2005e). As argamassas com 10% e 20% de substituições apresentam resultados inferiores às outras argamassas (RF e R15), ambas pertencente a classe A2.
- e) Através dos resultados obtidos, os resíduos de rochas ornamentais mostraram-se um material adequado para a utilização em argamassas, pois as argamassas produzidas com os resíduos de rochas ornamentais apresentam resultados similares à argamassa referência nas propriedades de uma argamassa de revestimento. Desta forma, as substituições não prejudicaram a qualidade das argamassas. Pode-se dizer, portanto, que é possível substituir o cimento por resíduos de rochas ornamentais até 20%. Contudo, considerando o melhor resultado obtido no ensaio de resistência de aderência à tração nos blocos cerâmicos utilizados, o melhor teor de substituição do cimento por resíduos de rochas ornamentais foi o de 15%. Cabe salientar, ainda, que além dos benefícios técnicos, a substituição promove benefícios ambientais, graças à redução dos impactos gerados pela grande quantidade de resíduo, o que propicia uma melhor destinação ao mesmo. Tal fator tem particular importância, visto que a redução de cimento é um dos fatores responsáveis pela emissão de dióxido de carbono

no mundo. Além disso, a substituição pode promover uma redução de custo, devido à diminuição do consumo de cimento.

## 6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Através dos resultados obtidos com a utilização dos resíduos de rochas ornamentais, diversas pesquisas podem contribuir para um melhor reaproveitamento dos resíduos. Desta forma, como sugestões para trabalhos futuros sugere-se:

- Avaliar a substituição do cimento em maiores teores do que os do presente trabalho;
- Analisar a substituição parcial do cimento por resíduos de rochas ornamentais nas propriedades de uma argamassa de assentamento;
- Avaliar a microestrutura das argamassas com a substituição parcial do cimento por resíduos de rochas ornamentais;
- Avaliar a durabilidade das argamassas com substituições de cimento por resíduos de rochas frente a ataques ácidos.

## REFERÊNCIAS

- ABUKERSH, S. A.; FAIRFIELD, C. A. Recycled aggregate concrete produced with red granite dust as a partial cement replacement. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 10, p. 4088-4994, 2011.
- AGUIAR, M.C. **Utilização de resíduo de serragem de rocha ornamental com tecnologia de fio diamantado em cerâmica vermelha**. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais) – Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2012.
- AIQIN, Wang; CHENGZHI, Zhang; NINGSHENG, Zhang. The theoretic analysis of the influence of the particle size distribution of cement system on the property of cement. **Cement and Concrete research**, v. 29, n. 11, p. 1721-172 1999.
- AKBULUT, Hüseyin *et al.* Investigation of using granite sludge as filler in bituminous hot mixtures. **Construction and Building Materials**, v. 36, p.430-436, 2012.
- ALENCAR, Carlos Rubens Araujo. **Rochas ornamentais: manual de caracterização, aplicação, uso e manutenção das principais rochas comerciais no Espírito Santo**. 1. ed. Cachoeiro do Itapemirim: IEL-ES, 2013. Disponível em: <http://www.sindirochas.com/arquivos/manual-rochas.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2019.
- ALIABDO, Ali A.; ELMOATY, Abd Elmoaty M. Abd; AUDA, Esraa M. Re-use of waste marble dust in the production of cement and concrete. **Construction and building materials**, v. 50, p. 28-41, 2014.
- ALVES, M. S. **Estudo das Características e da Viabilidade do Uso de Resíduos Gerados no Polimento de Rochas Graníticas como Adição em Concretos**. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.
- ALYAMAC, K. E.; TUGRUL, E. A durable, eco-friendly and aesthetic concrete work: marble concrete. *In: International Congress on Advances in Civil Engineering (ACE 2014)*, Ed. 11., 2014, Istanbul-Turkey. **Anais eletrônicos [...]**. Istanbul-Turkey: Istanbul technical university, 2014. P. 21-25.
- ALYAMAC, Kürşat Esat; INCE, Ragip. A preliminary concrete mix design for SCC with marble powders. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 3, p. 1201-1210, 2009.
- ANGELIM, Renato R.; ANGELIM, Susane C. M.; CARASEK, Helena. Influência da adição de finos calcários, silicosos e argilosos nas propriedades das argamassas e dos revestimentos. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS (SBTA)*, 5., 2003, São Paulo. **Anais eletrônicos [...]**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2003. p. 401-416.
- APOLINÁRIO, E. C. A. **Influência da adição do resíduo proveniente do corte de mármore e granito (RCMG) nas propriedades de argamassas de cimento Portland**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana) - Programa de

Pós-Graduação em Engenharia Ambiental Urbana, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2014.

ARNOLD, Daiana Cristina Metz. **Análise da influência da forma dos grãos nas propriedades das argamassas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo - RS, 2011.

ARUNTAS, Hüseyin Yılmaz *et al.* Utilization of waste marble dust as an additive in cement production. **Materials & Design**, v. 31, n. 8, p. 4039-4042, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16697**: Cimento Portland: requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: Resíduos sólidos: classificação. Rio de Janeiro, 2004.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13277**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: determinação da retenção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2005a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13278**: argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos: determinação da densidade de massa e teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro: 2005c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13280**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro: 2005d.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13528**: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Determinação da resistência de aderência à tração. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15261**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da variação dimensional (retração ou expansão linear). Rio de Janeiro, 2005f.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15630**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2009a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7175**: Cal hidratada para argamassas – requisitos. Rio de Janeiro, 2003a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecido – Determinação da absorção de água, índices de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005g.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: agregados: determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 27**: Agregados - Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 46**: Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira de 75 $\mu$ m, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: agregado miúdo: determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009b.

BACARJI, E. *et al.* Sustainability perspective of marble and granite residues as concrete fillers. **Construction and Building materials**, v. 45, 2013.

BANDEIRA, Caroline Mateus. **Utilização de resíduo de corte de mármore em argamassa**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado Engenharia Civil)- Universidade federal da integração Latino-Americana (UNILA), Foz do Iguaçu-PR, 2017.

BARBOSA, K. C. **Avaliação experimental do fenômeno de retração em alvenaria de blocos de concreto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós- Graduação em Construção Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2005.

BAUER, E. (coord.). **Revestimento de argamassa**: características e peculiaridades. Brasília, DF: LEM-UnB, 2005.

BELAIDI, A. S. E. *et al.* Effect of natural pozzolana and marble powder on the properties of self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 31, p. 251-257, 2012.

BONAVETTI, V. L.; IRASSAR, E. F. The effect of stone dust content in sand. **Cement and Concrete Research**, v. 24, n. 3, p. 580-590, 1994.

BUYUKSAGIS, Ismail Sedat; UYGUNOGLU, Tayfun; TATAR, Er Dietrich. Investigation on the usage of waste marble powder in cement-based adhesive mortar. **Construction and Building Materials**, v. 154, p. 734-742, 2017.

CALMON, J. L. *et al.* Aproveitamento do resíduo de corte de granito para a produção de argamassas de assentamento. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS*, 2., 1997, Salvador, BA. **Anais eletrônicos** [...]. Salvador, BA: Universidade federal da Bahia e Universidade estadual de Feira de Santana, 1997. p. 64-75.

CASTRO, N. F. *et al.* Impacto do APL de rochas ornamentais do Espírito Santo nas comunidades. *In: RECURSOS* minerais e sustentabilidade territorial. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2011. v. 2. p. 139-176.

CHIODI FILHO, Cid. **Balço das Exportações e Importações Brasileiras de rochas ornamentais no 1º Trimestre de 2019**. Kistemann e chiodu assessoria e projetos, ABIROCHAS, 2019. Disponível em... Acesso em: <[www.abirochas.com.br](http://www.abirochas.com.br)> 10 mar. 2020.

CHIODI FILHO, Cid. **O setor Brasileiro de rochas ornamentais**, ABIROCHAS, 2018. Disponível em... Acesso em: <[www.abirochas.com.br](http://www.abirochas.com.br)> 30 nov. 2018.

CHIODI FILHO, Cid. **Produção Brasileira de lavra**. ABIROCHAS, 2018. Disponível em... Acesso em: <[www.abirochas.com.br](http://www.abirochas.com.br)> 18 fev. 2019.

CHIODI FILHO, Cid. **Tipologia das rochas ornamentais**. ABIROCHAS, 2018. Disponível em... Acesso em: <[www.abirochas.com.br](http://www.abirochas.com.br)> 15 out. 2018.

CHOUDHARY, Antara; SHAH, Vineet; BISHNOI, Shashank. Effect of low cost fillers on cement hydration. **Construction and Building Materials**, v. 124, p. 533-543, 2016.

CUNHA, Luiz Maurício da Silva; ANDRADE, Maria Lúcia Amarante de; SOUZA, Elisa Seixas de. Rochas ornamentais: exportações promissoras. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 17, p. 69-92, 2003.

CYR, Martin; LAWRENCE, Philippe; RINGOT, Erick. Efficiency of mineral admixtures in mortars: quantification of the physical and chemical effects of fine admixtures in relation with compressive strength. **Cement and concrete research**, v. 36, n. 2, p. 264-277, 2006.

DE CASTRO, A. L.; PANDOLFELLI, V. C. Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica**, v. 55, n. 333, p. 18-32, 2009.

DEMIREL, Bahar. The effect of the using waste marble dust as fine sand on the mechanical properties of the concrete. **International journal of physical sciences**, v. 5, n. 9, p. 1372-1380, 2010.

DIETRICH, Y. P; TELES, C. R; VIEIRA, G. L. Desempenho mecânico e análise da corrosão das armaduras em concretos produzidos com adição de resíduos de rochas ornamentais. **Revista Matéria**, v. 22, n. 4, 2017.

DONATO, Cláudio José *et al.* Reciclagem de Resíduos da Construção Civil. **Coloquium Humanarum**, Universidade do Oeste paulista- UNOESTE, Presidente Prudente, SP, vol.14, n. especial, Jul.- Dez, p. 666-670, 2017.

EL-ALFI, E. A.; GADO, R. A. Preparation of calcium sulfoaluminate-belite cement from marble sludge waste. **Construction and Building Materials**, v. 113, p. 764-772, 2016.

FIORITO, A. J. S. I. **Manual de argamassas e revestimentos**: estudos e procedimentos de execução. São Paulo, PINI, 2. Ed. 2009.

FONSECA, J. F. **Efeitos do resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais e escória de aciaria como fileres na rigidez viscoelástica linear e características de fratura da matriz de agregados finos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2016.

FRANÇA, Bruno Rangel. **Avaliação dos efeitos da incorporação de resíduo calcário do beneficiamento do mármore em blocos de encaixe de solo-cimento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Riveiro, Campos dos Goytacazes-RJ, 2017.

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

GENCEL, Osman *et al.* Properties of concrete paving blocks made with waste marble. **Journal of Cleaner Production**, v. 21, n. 1, p. 62-70, 2012.

GONÇALVES, G.P. **Estudo da substituição da cal hidratada por resíduo de mármore na produção de argamassa**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2011.

GONÇALVES, Jardel Pereira. **Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para produção de concretos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

GUPTA, Lalit Kumar; VYAS, Ashok Kumar. Impact on mechanical properties of cement sand mortar containing waste granite powder. **Construction and Building Materials**, v. 191, p. 155-164, 2018.

HANSEN, D.M. **Avaliação das propriedades pozolânicas de um resíduo de cerâmica vermelha para emprego como material cimentício suplementar**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2016.

HEBHOUB, H. *et al.* Use of waste marble aggregates in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 3, p. 1167-1171, 2011.

HOPPE FILHO, J. **Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: Mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto**. Tese (Doutorado em

Engenharia de Construção Civil) - Escola politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

IRASSAR, E. F. *et al.* Hydration and properties of ternary cement with calcareous filler and slag. **Revista ALCONPAT**, v. 5, n. 2, p. 83-95, 2015.

JOHN, Elisabeth; MATSCHEI, Thomas; STEPHAN, Dietmar. Nucleation seeding with calcium silicate hydrate—A review. **Cement and Concrete Research**, v. 113, p. 74-85, 2018.

JOHN, Vanderley M. *et al.* Fillers in cementitious materials—Experience, recent advances and future potential. **Cement and Concrete Research**, v. 114, p. 65-78, 2018.

KABEER, KI Syed Ahmed; VYAS, Ashok Kumar. Utilization of marble powder as fine aggregate in mortar mixes. **Construction and Building Materials**, v. 165, p. 321-332, 2018.

KHYALIYA, Rajendra Kumar; KABEER, KI Syed Ahmed; VYAS, Ashok Kumar. Evaluation of strength and durability of lean mortar mixes containing marble waste. **Construction and Building Materials**, v. 147, p. 598-607, 2017.

KOPSCHITZ, P. *et al.* Estudo da retração e do desenvolvimento de propriedades mecânicas de argamassas mistas para revestimento. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 2., 1997, Salvador, BA. **Anais eletrônicos [...]**. Salvador, BA: Universidade Federal da Bahia: Universidade estadual de Feira de Santana, 1997. p. 120-132.

KORE, Sudarshan D.; VYAS, A. K. Impact of marble waste as coarse aggregate on properties of lean cement concrete. **Case Studies in Construction Materials**, v. 4, p. 85-92, 2016.

KUMAYAMA, R. *et al.* Estudo da viabilidade do emprego de pó de mármore para produção de concreto auto adensável e substituição parcial dos agregados por pérolas de poliestireno expandido (EPS). **REEC-Revista Eletrônica de Engenharia civil**, v.10, n.2, p. 56-71, 2015.

LAWRENCE, Philippe; CYR, Martin; RINGOT, Erick. Mineral admixtures in mortars: effect of inert materials on short-term hydration. **Cement and concrete research**, v. 33, n. 12, p. 1939-1947, 2003.

LI, L. G. *et al.* Filler technology of adding granite dust to reduce cement content and increase strength of mortar. **Powder Technology**, v. 342, p. 388-396, 2019a.

LI, L. G. *et al.* Recycling of marble dust as paste replacement for improving strength, microstructure and eco-friendliness of mortar. **Journal of cleaner production**, v. 210, p. 55-65, 2019b.

LI, L. G. *et al.* Use of marble dust as paste replacement for recycling waste and improving durability and dimensional stability of mortar. **Construction and Building Materials**, v. 166, p. 423-432, 2018.

LIMA, Wandenberg Bismarck Colaço; LIRA, H. L.; NEVES, G. A. Incorporação de resíduo lama do processo de beneficiamento de granito na argamassa expansiva de demolição. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 11, n. 2, p. 89-95, 2016.

LISBOA, E. M. **Obtenção do concreto auto-adensável utilizando resíduo do beneficiamento do mármore e granito e estudo de propriedades mecânicas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia em Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal Alagoas, Maceió, 2004.

LOPES, J. L. M. P. **Influência da utilização do resíduo de beneficiamento de mármore e granito (RBMG), como filer, nas propriedades do concreto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia do Meio Ambiente, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2007.

LOTENBACH, Barbara *et al.* Influence of limestone on the hydration of Portland cements. **Cement and Concrete Research**, v. 38, n. 6, p. 848-860, 2008.

MAGACHO, I.; SILVA, R. B. *et al.* Identificação e gerenciamento dos resíduos gerados em empresas de beneficiamento de rochas ornamentais localizadas no município de Nova Venécia–ES–BRASIL. *In*: CONGRESO INTERAMERICANO DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL. 30., 2006, Punta del Este, Uruguay. **Anais eletrônicos** [...]. Punta del Este, Uruguay: A sociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental – AIDIS, 2006.

MANHÃES, João Paulo Vargas Tavares; HOLANDA, José Nilson França de. Caracterização e classificação de resíduo sólido " pó de rocha granítica" gerado na indústria de rochas ornamentais. **Química Nova**, v. 31, n. 6, p. 1301-1304, 2008.

MANTELLATO, S.; PALACIOS, M.; FLATT, R. J. Reliable specific surface area measurement on anhydrous cements. **Cement and Concrete Research**, v. 67, p. 286-291, 2015.

MARGUERON, Claudio; MELLO, Edson Farias. Estratégias competitivas para empresas de rochas ornamentais na região metropolitana do Rio de Janeiro. **Anuário do Instituto de Geociências**, Rio de Janeiro, v. 28, n. 2, p. 71-101, 2005.

MASHALY, Ahmed O.; SHALABY, Basel N.; RASHWAN, Mohammed A. Performance of mortar and concrete incorporating granite sludge as cement replacement. **Construction and Building Materials**, v. 169, 800-818, 2018.

MATTA, Vanessa Ribeiro Peixoto *et al.* Efeitos da adição do resíduo de corte de mármore e granito (RCMG) no desempenho de argamassas de cimento Portland no estado endurecido. **Periódico Eletrônico IX Fórum Ambiental da Alta Paulista**, [s. l.], v. 9, n. 1, p. 87-104, 2013.

MEDINA, G. *et al.* Granite quarry waste as a future eco-efficient supplementary cementitious material (SCM): Scientific and technical considerations. **Journal of cleaner production**, v. 148, p. 467-476, 2017.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 2008.

MEHTA, P.K. E MONTEIRO, P.J.M.: **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2ª Edição. Nicole P. Hasparyk. Editora IBRACON. São Paulo. 2014.

MIRANDA, R. A. C. **Viabilidade técnica da aplicação de resíduo de beneficiamento de mármore e granito em tijolos de solo-cimento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia do Meio Ambiente, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2007.

MUNIR, Muhammad Junaid *et al.* Thermally efficient fired clay bricks incorporating waste marble sludge: an industrial-scale study. **Journal of cleaner production**, v. 174, p. 1122-1135, 2018.

NAKAKURA, Elza H.; CINCOTTO, Maria A. Análise dos requisitos de classificação de argamassas de assentamento e revestimento. **Boletim técnico da Escola Politécnica da USP / Departamento de Engenharia de Construção Civil**, São Paulo, n. 359, 2004.

NEVES, G. de A. **Reciclagem de Resíduos da Serragem de Granitos para uso como Matéria-Prima Cerâmica**. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2002.

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

NOGAMI, Lizandra. **Investigação da influência das características petrográficas e da rugosidade de placas de "granitos e mármore" fixadas com argamassas**. 2013. Tese (Doutorado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

NUNES, R. L. S.; FERREIRA, H. S.; NEVES, G. A. Utilização de resíduos de granito na indústria de revestimento cerâmico. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 48., 2004, Curitiba, PR. **Anais eletrônicos** [...]. Curitiba, PR: Associação Brasileira de cerâmica, 2004. p. 1-10.

OLIVEIRA, Adriane Maria Wanderley *et al.* Verificação da resistência à compressão em concreto com adição de fíler calcário. *In*: CONFERÊNCIA NACIONAL DE PATOLOGIA E RECUPERAÇÃO DE ESTRUTURAS (CONPAR), Recife. **Anais eletrônicos** [...]. Recife: [s. n.], 2017.

OLIVEIRA, D. M. *et al.* Utilização de resíduo de granito como substituição ao cimento Portland em matrizes cimentícias. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 53., 2011, Florianópolis, SC. **Anais eletrônicos** [...]. Florianópolis, SC: Instituto dos auditores independentes do Brasil, 2011.

OLIVEIRA, D. N. S. *et al.* Cimento para poço de petróleo desenvolvido a partir de cimento comum: caracterização física, química e mineralógica. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA*, 56.; *CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE CERÂMICA*, 1.; *BRAZILIAN SYMPOSIUM ON GLASS AND RELATED MATERIALS*, 9., 2012, Curitiba, PR. **Anais eletrônicos** [...]. Curitiba, PR: Associação Brasileira de cerâmica, 2012.

OLIVEIRA, M. L. L. **Influência da adição de fibras de polipropileno em argamassas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

OLIVEIRA, T. **Caracterização do resíduo de serragem de rochas ornamentais para aplicações geotécnicas**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

OUYANG, Xiaowei *et al.* Understanding the adhesion mechanisms between CSH and fillers. **Cement and Concrete Research**, v. 100, p. 275-283, 2017.

PALM, Sebastian *et al.* Cements with a high limestone content–Mechanical properties, durability and ecological characteristics of the concrete. **Construction and building materials**, v. 119, p. 308-318, 2016.

PEÑA, MANUEL RAMÓN GRULLÓN. **Estudo da Fissuração Associada à Retração em Argamassas para Reparo em Estruturas de Concreto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

PEREIRA, Larissa Santini. **Influência do uso dos resíduos de corte de granito como fíler no desempenho do concreto**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2016.

RAHHAL, V.; TALERO, R. Early hydration of Portland cement with crystalline mineral additions. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 7, p. 1285-1291, 2005.

RAI, Baboo *et al.* Influence of Marble powder/granules in concrete mix. **International journal of civil and structural engineering**, v. 1, n. 4, 2011.

RAMOS, Telma *et al.* Granitic quarry sludge waste in mortar: Effect on strength and durability. **Construction and Building Materials**, v. 47, p. 1001-1009, 2013.

RANA, Aditya *et al.* Recycling of dimensional stone waste in concrete: A review. **Journal of cleaner production**, v. 135, p. 312-331, 2016.

REIS, A. S. dos; ALVAREZ, C. E. de. A sustentabilidade e o resíduo gerado no beneficiamento das rochas ornamentais. *In: ENCONTRO NACIONAL*, 4.; *ENCONTRO LATINO-AMERICANO SOBRE EDIFICAÇÕES E COMUNIDADES SUSTENTÁVEIS*, 2., 2007, Mato Grosso do Sul. **Anais eletrônicos** [...]. Mato Grosso do Sul: Universidade federal de Mato Grosso do Sul: Universidade estadual de Londrina: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007. p. 511-520.

RILEM TECHNICAL COMMITTEES. RILEM TC 116 PCD: Permeability of concrete as a criterion of its durability. **Materials and Structures**, [s. l.], v. 32, p. 174-179, 1999.

RODRIGUES, R.; DE BRITO, J.; SARDINHA, M. Mechanical properties of structural concrete containing very fine aggregates from marble cutting sludge. **Construction and Building Materials**, v. 77, p. 349-356, 2015.

SABOYA JR, F.; XAVIER, G. C.; ALEXANDRE, J. The use of the powder marble by-product to enhance the properties of brick ceramic. **Construction and Building Materials**, v. 21, n. 10, p.1950-1960, 2007.

SALES, A. T. C.; SÁ, B. R. C.; SANTOS, D. Argamassas com substituição parcial do agregado miúdo por pó de mármore. *In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO*, 15., 2014, Maceió. **Anais eletrônicos [...]**. Maceió: Associação nacional de tecnologia do ambiente construído, 2014. p. 2471- 2481.

SÁNCHEZ, J. A.; BARRIOS, J.; BARRIOS, A.; AGUDO, A. R. A. La retracción en los morteros de cal. **Materiales de construcción**. Vol. 47. n. 245, p. 27-44, 1997.

SANTOS, Gabriel Ricardo Silva; Apolinário, Elenice Carmo de Abreu; RIBEIRO, Daniel Véras. Influência da adição do resíduo de corte de mármore e granito (RCMG) na reologia das argamassas. **Periódico Eletrônico IX Fórum Ambiental da Alta Paulista**, [s. l.], v. 9, n. 1, p. 70-86, 2013.

SANTOS, M. L. L.O. **Aproveitamento de resíduos minerais na formulação de argamassas para a construção civil**. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de materiais) - Programa de Pós Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.163p.

SANTOS, T. J. et al. Efeito da substituição parcial do cimento por resíduo de mármore na hidratação de pastas. *in: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS (CBECIMAT)*, 23., 2018, Foz do Iguaçu- PR. **Anais eletrônicos [...]**. Foz do Iguaçu-PR: Instituto de pesquisa energéticas e nucleares (IPEN), 2018.

SCARTEZINI, Luís Maurício et al. Influência do preparo da base na aderência e na permeabilidade à água dos revestimentos de argamassa. **Ambiente Construído**, v. 2, n. 2, p. 85-92, 2002.

SCHAFER, Mauricio. **Análise da influência de elevadas temperaturas em revestimento de argamassa**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós- Graduação em engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo - RS, 2015.

SCRIVENER, Karen L.; JUILLAND, Patrick; MONTEIRO, Paulo JM. Advances in understanding hydration of Portland cement. **Cement and Concrete Research**, v. 78, p. 38-56, 2015.

SEBASTIANY, L. D. **Avaliação de métodos de determinação do potencial pozolânico de resíduos da indústria de cerâmica vermelha**. Dissertação

(Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos (Unisinos), São Leopoldo, 2014.

SILVA, A. P. de A. **Caracterização e classificação ambiental da lama do beneficiamento de rochas ornamentais**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química Industrial) - Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2013.

SILVA, C. M.; FLORES-COLEN, I.; GASPAR, S. Numerical analysis of renders' adhesion using an interface model. **Construction and Building Materials**, v. 38, p. 292-305, 2013.

SILVA, Cícero Joelson Vieira. **Aplicação de resíduos de pedras ornamentais na produção de argamassas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Católica de Pernambuco, Recife – PE, 2017.

SILVA, N. G.; CAMPITELI, V. C.; GLEIZE, P. J. P. Argamassa de revestimento de cimento, cal e areia de britagem de rocha calcária. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 7., 2007, Recife. **Anais eletrônicos** [...]. Recife: ANTAC/ABAI, 2007.

SILVA, Narciso G.; BUEST, Guilherme; CAMPITELI, Vicente C. Argamassas com areia britada: influência dos finos e da forma das partículas. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 6.; INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MONTARS TECHNOLOGY, 1., 2005, Florianópolis. **Anais eletrônicos** [...]. Florianópolis: Universidade federal de Santa Catarina, 2005.

SILVA, Narciso Gonçalves da. **Argamassa de revestimento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária**. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

SILVEIRA, Leonardo L. L. *et al.* **Tecnologia de rochas ornamentais**: pesquisa, lavra e beneficiamento. Rio de Janeiro: CETEM, 2014.

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

SOARES, R. B. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos produzidos com a incorporação de resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2014.

SOSSAI, F. J. M. **Caracterização tecnológica de rochas ornamentais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.

SOUSA, J. G. **Análise ambiental do processo de extração e beneficiamento de rochas ornamentais com vistas a uma produção mais limpa: aplicação em**

**Cachoeiro de Itapemirim – ES.** Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Análise Ambiental) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2007.

SUTCU, M.; ALPTEKIN, H.; ERDOGMUS, E.; ER, Y.; GENCEL, O. Characteristics of fired clay bricks with waste marble powder addition as building materials. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 82, p. 1-8, 2015.

TENNICH, Mohsen; KALLEL, Abderrazek; OUEZDOU, Mongi Ben. Incorporation of fillers from marble and tile wastes in the composition of self-compacting concretes. **Construction and building materials**, v. 91, p. 65-70, 2015.

TENÓRIO, J. J. L.; LAMEIRAS, R. M.; LIMA, L. A. de. Desempenho de argamassas produzidas com resíduos do beneficiamento de chapas de granito (RBCG). *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 6.; INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MONTARS TECHNOLOGY, 1., 2005, Florianópolis. **Anais eletrônicos** [...]. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.

TOPÇU, Ilker Bekir; BILIR, Turhan; UYGUNOĞLU, Tayfun. Effect of waste marble dust content as filler on properties of self-compacting concrete. **Construction and building Materials**, v. 23, n. 5, p. 1947-1953, 2009.

TRISTÃO, F. A. **Influência dos parâmetros texturais das areias nas propriedades das argamassas mistas de revestimento.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

TUNC, Esra Tugrul. Recycling of marble waste: A review based on strength of concrete containing marble waste. **Journal of environmental management**, v. 231, p. 86-97, 2019.

ULIANA, Juliana Gavini. **Tratamento térmico da lama do beneficiamento de rochas ornamentais: aplicação como pozolana em matrizes cimentícias.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2014.

URAL, Nazile; KARAKURT, Cenk; COMERT, Ahmet Tuna. Influence of marble wastes on soil improvement and concrete production. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 16, n. 3, p. 500-508, 2014.

UYSAL, Mucteba. The influence of coarse aggregate type on mechanical properties of fly ash additive self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 37, p. 533-540, 2012.

UYSAL, Mucteba; SUMER, Mansur. Performance of self-compacting concrete containing different mineral admixtures. **Construction and Building materials**, v. 25, n. 11, p. 4112-4120, 2011.

UYSAL, Mucteba; YILMAZ, Kemalettin. Effect of mineral admixtures on properties of self-compacting concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, n. 7, p. 771-776, 2011.

VARDHAN, Kirti *et al.* Mechanical properties and microstructural analysis of cement mortar incorporating marble powder as partial replacement of cement. **Construction and Building Materials**, v. 96, p. 615-621, 2015.

VIJAYALAKSHMI, M.; SEKAR, A. SS.; PRABHU, G. G. Strength and durability properties of concrete made with granite industry waste. **Construction and Building Materials**, v. 46, p. 1-7, 2013.

WANG, Dehui *et al.* A review on use of limestone powder in cement-based materials: Mechanism, hydration and microstructures. **Construction and Building Materials**, v. 181, p. 659-672, 2018.

XI, Yuting *et al.* Fresh and hardened properties of cement mortars using marble sludge fines and cement sludge fines. **Construction and Building Materials**, v. 220, p. 142-148, 2019.

YOSHIDA, A. T.; BARROS, M. S. B. Caracterização de argamassas no estado fresco: peculiaridade na análise de argamassas industrializadas. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 1., 1995, Goiânia. **Anais eletrônicos** [...]. Goiânia: Universidade federal de Goiás, 1995. p. 53-62.

## APÊNDICE A - RESULTADOS DAS PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO

### Densidade de massa

Densidade					
traço	recipiente cheio	recipiente vazio	volume do frasco	densidade	média
RF (1)	3116,8	2215	429	2102,10	2087,76
RF (2)	3104,7	2215,2	429	2073,43	
R10	3094,6	2216,2	429	2047,55	2034,19
R10 (2)	3088,1	2216,2	429	2032,40	
R10 (3)	3084,1	2216,4	429	2022,61	
R15(1)	3088,7	2216,4	429	2033,33	2033,33
R20 (1)	3088,1	2216,2	429	2032,40	2039,57
R 20 (2)	3101,5	2216,4	429	2063,17	
R20 (3)	3103,6	2216,2	429	2068,53	
R20 (4)	3071,8	2216,3	429	1994,17	

### Retenção de água

Retenção								
traço	conjunto com argamassa	após a sucção argamassa	conjunto vazio	massa da água	massa argamassa	AF	Retenção	média
RF (2)	1250,30	1247,70	593,90	222,40	1347,90	0,14	97,20	97,20
R10 (1)	1278,40	1275,60	595,20	198,90	1337,20	0,13	96,83	96,87
R10 (2)	1191,80	1189,40	594,40	198,90	1337,20	0,13	96,90	
R15(1)	1306,70	1305,20	592,70	189,00	1344,70	0,12	98,30	98,30
R20 (1)	1205,60	1203,50	593,70	177,30	1339,00	0,12	97,06	96,97
R20 (2)	1224,30	1222,00	593,90	177,30	1339,00	0,12	96,88	

**Teor de ar incorporado**

teor de ar incorporado		
traço	% ar incorporado	Média
RF (1)	5	5,0
RF (2)	5	
R10 (1)	9	9,5
R10 (2)	9,8	
R10 (3)	9,8	
R15 (1)	9,7	9,8
R15 (2)	9,9	
R20 (1)	11	11,5
R20 (2)	12	

**APÊNDICE B - RESULTADOS DAS PROPRIEDADES NO ESTADO  
ENDURECIDO**

**Densidade de massa no estado endurecido**

Densidade de massa no estado endurecido Kg/m <sup>3</sup>					
	corpo de prova	massa g	volume cm <sup>3</sup>	Densidade kg/m <sup>3</sup>	Média
RF	cp1	558,5	270,9	2061,6	2064,95
	cp2	575,5	277,4	2074,4	
	cp3	567,1	275,4	2058,8	
R10	cp1	547	274,8	1990,4	1994,92
	cp2	531,7	265,9	1999,4	
	cp3	548,6	275,0	1994,9	
R15	cp1	539,4	272,1	1982,5	2000,71
	cp2	549,7	274,4	2003,3	
	cp3	544,9	271,4	2008,0	
	cp4	544,1	272,9	1994,1	
	cp5	552,5	274,1	2015,6	
R20	cp1	528,1	263,7	2002,8	2010,65
	cp2	547,9	270,3	2027,1	
	cp3	541,8	270,6	2002,0	

## Módulo de elasticidade

modulo de elasticidade							
traço	comprimento	tempo (média)	velocidade	Densidade	coeficiente de poisson	modulo de elasticidade GPa	média
RF	163,8	50,4	3,25	2061,6	0,2	19,6	19,71
	164,7	50,6	3,26	2074,4	0,2	19,8	
	164,3	50,5	3,26	2060,1	0,2	19,7	
R10	161,2	49,9	3,23	1990,4	0,2	18,7	18,91
	161,8	49,7	3,26	1999,3	0,2	19,1	
	161,9	49,8	3,25	1994,9	0,2	19,0	
R15	162,5	48,7	3,34	1980,1	0,2	19,9	20,21
	161,7	48,8	3,32	2003,3	0,2	19,8	
	162,0	49,2	3,30	2008,0	0,2	19,6	
	161,8	48,9	3,31	1994,1	0,2	19,7	
	162,0	49,0	3,31	2015,6	0,2	22,1	
R20	163,7	47,9	3,42	1944,1	0,2	20,4	20,97
	164,6	47,9	3,44	2043,7	0,2	21,7	
	164,0	48,2	3,40	1993,1	0,2	20,8	

## Resistência à compressão

Resistência a compressão									
Traço	Idade (dias)	Força (N)	Resistência (Mpa)	Média	Traço	Idade (dias)	Força (N)	Resistência (Mpa)	Média
RF	7 dias	10806	6,75	6,67	R10	7 dias	11180	6,99	6,84
		11182	6,99				11434,6	7,15	
		11182	6,99				11182	6,99	
		10554	6,60				10931	6,83	
		11308	7,07				10554	6,60	
		10680	6,68				11015	6,88	
		10052	6,28				10261	6,41	
		11057	6,91						
		10303	6,44						
		9549	5,97						
RF	14 dias	11685	7,30	7,43	R10	14 dias	12939	8,09	7,82
		11434	7,15				11936	7,46	
		12062	7,54				13444	8,40	
		11350	7,09				12020	7,51	
		12606	7,88				11811	7,38	
		11685	7,30				12942	8,09	
		11559	7,22						
		12062	7,54						
		11559	7,22						
		12690	7,93						
12113	7,57								
RF	28 dias	16334	10,21	9,81	R10	28 dias	13109	8,19	8,01
		15203	9,50				11853	7,41	
		16208	10,13				13863	8,66	
		16962	10,60				13360	8,35	
		14449	9,03				12439	7,77	
		14449	9,03				12439	7,77	
		14701	9,19				13444	8,40	
		15203	9,50				13193	8,25	
		16962	10,60				12188	7,62	
		16585	10,37				12271	7,67	
15454	9,66								
15831	9,89								
15706	9,82								

Resistência a compressão											
Traço	Idade (dias)	Força (N)	Resistência (Mpa)	Média	Traço	Idade (dias)	Força (N)	Resistência (Mpa)	Média		
R15	7 dias	11685	7,30	7,58	R20	7 dias	13318	8,32	7,69		
		12439	7,77				11936	7,46			
		11559	7,22				11476	7,17			
		11062	6,91				12313	7,70			
		12439	7,77				12439	7,77			
		12565	7,85		R20	14 dias	15203	9,50	9,19		
		13109	8,19				15161	9,48			
		12313	7,70				14324	8,95			
		12942	8,09				14198	8,87			
		12439	7,77				14030	8,77			
					12690	7,93			15329	9,58	
					11182	6,99	R20	28 dias	16585	10,37	9,63
					11308	7,07			16585	10,37	
R15	14 dias	15077	9,42	8,78			14030	8,77			
		14826	9,27			14826	9,27				
		14701	9,19			15789	9,87				
		14449	9,03			16543	10,34				
		13947	8,72			14701	9,19				
		13821	8,64			15161	9,48				
		13695	8,56			14449	9,03				
		12942	8,09			16334	10,21				
		13654	8,53			14449	9,03				
		13316	8,32								
R15	28 dias	15077	9,42	9,45							
		15496	9,69								
		15831	9,89								
		14826	9,27								
		14952	9,35								
		15329	9,58								
		14324	8,95								
		15454	9,66								
		14449	9,03								
		13695	8,56								
		15580	9,74								
		14324	8,95								
		15454	9,66								
		15831	9,89								
16208	10,13										

## Resistência à tração

Resistência a tração									
Traço	Idade	força aplicada	Resistencia a tração	média	Traço	Idade	força aplicada	resistência a tração	média
RF	7 dias	873	2,46	2,37	R10	7 dias	801	2,25	2,21
		797	2,24				772	2,17	
		783	2,20				779	2,19	
		942	2,65				788	2,22	
		825	2,32		R10		14 dias	808	
RF	14 dias	919	2,58	2,59			920	2,59	
		876	2,46			869	2,44		
		951	2,67			874	2,46		
		938	2,64			828	2,33		
		933	2,62			933	2,62		
		889	2,50			847	2,38		
		933	2,62			928	2,61		
RF	28 dias	1058,00	2,98	2,91			878	2,47	
		966	2,72			770	2,17		
		1013	2,85		R10	28 dias	908	2,55	2,62
		1118	3,14			951	2,67		
		1052	2,96			907	2,55		
		929	2,61			912	2,57		
		1016	2,86			993	2,79		
		1109	3,12			909	2,56		
		1067	3,00						
		1097	3,09						
		1000	2,81						
		988	2,78						

Resistência a tração											
Traço	Idade	força aplicada	resistência a tração	média	Traço	Idade	força aplicada	resistência a tração	média		
R15	7 dias	869	2,44	2,26	R20	7 dias	924	2,60	2,57		
		731	2,06				974	2,74			
		745	2,10				847	2,38			
		849	2,39		R20	14 dias	907	2,55		2,63	
		869	2,44				975	2,74			
		760	2,14				918	2,58			
R15	14 dias	903	2,54	2,48	R20	14 dias	962	2,71	2,67		
		820	2,31				907	2,55			
		870	2,45				R20	28 dias			879
		905	2,55		988	2,78					
		912	2,57		950	2,67					
R15	28 dias	1079,00	3,03	3,15	R20	28 dias	894	2,51	2,67		
		1143	3,21				1017	2,86			
		1076	3,03				970	2,73			
		1177	3,31								
		1027	2,89								
		1182	3,32								
		1026	2,89								
		1202	3,38								
		1093	3,07								
		1184	3,33								

## Varição dimensional

Referência			R10		
Retração 7 dias			Retração 7 dias		
	variação dimensional	variação de massa		variação dimensional	variação de massa
cp1	0,528	6,851	cp1	0,312	4,067
cp2	0,529	6,782	cp2	0,423	5,905
cp3	0,593	7,025	cp3	0,495	5,932
cp4	0,527	7,247	cp4	0,545	5,849
cp5	0,425	7,190	média geral	0,444	5,438
média geral	0,521	7,019	desvio absoluto	-0,13	
desvio absoluto	0,10				
Retração 14 dias			Retração 14 dias		
	variação dimensional	variação de massa		variação dimensional	variação de massa
cp1	0,805	7,028	cp1	0,675	4,435
cp2	0,801	6,985	cp2	0,740	6,190
cp3	0,911	7,380	cp3	0,652	6,139
cp4	0,767	7,447	cp4	0,716	6,161
cp5	0,653	7,340	média geral	0,696	5,731
média geral	0,787	7,236	desvio absoluto	-0,04	
desvio absoluto	-0,12				
Retração 28 dias			Retração 28 dias		
	variação dimensional	variação de massa		variação dimensional	variação de massa
cp1	0,865	6,927	cp1	0,800	4,330
cp2	0,864	6,909	cp2	0,871	6,087
cp3	1,011	7,329	cp3	0,764	6,139
cp4	0,869	7,372	cp4	0,827	6,031
cp5	0,759	7,240	média geral	0,815	5,646
média geral	0,874	7,155	desvio absoluto	-0,055	
desvio absoluto	-0,14				

R15			R20		
Retração 7 dias			Retração 7 dias		
	variação dimensional	variação de massa		variação dimensional	variação de massa
cp1	0,341	5,596	cp1	0,629	6,248
cp2	0,373	5,833	cp2	0,635	6,099
cp3	0,391	5,761	cp3	0,632	6,101
cp4	0,344	5,778	cp4	0,609	6,463
cp5	0,320	5,613	cp5	0,631	6,460
cp6	0,273	5,331	cp6	0,655	6,547
média geral	0,340	5,652	média geral	0,632	6,320
desvio absoluto	-0,07		desvio absoluto	-0,02	
Retração 14 dias			Retração 14 dias		
	variação dimensional	variação de massa		variação dimensional	variação de massa
cp1	0,763	6,606	cp1	0,777	6,531
cp2	0,760	6,693	cp2	0,811	6,408
cp3	0,764	6,569	cp3	0,820	6,412
cp4	0,711	6,585	cp4	0,796	6,814
cp5	0,745	6,617	cp5	0,839	6,863
cp6	0,731	6,516	cp6	0,859	6,901
média geral	0,746	6,598	média geral	0,817	6,655
desvio absoluto	-0,03		desvio absoluto	-0,04	
Retração 28 dias			Retração 28 dias		
	variação dimensional	variação de massa		variação dimensional	variação de massa
cp1	0,900	6,632	cp1	0,844	6,506
cp2	0,925	6,693	cp2	0,871	6,330
cp3	0,891	6,595	cp3	0,885	6,386
cp4	0,833	6,637	cp4	0,864	6,814
cp5	0,869	6,643	cp5	0,917	6,813
cp6	0,853	6,567	cp6	0,927	6,850
média geral	0,879	6,628	média geral	0,885	6,617
desvio absoluto	-0,05		desvio absoluto	-0,04	

## Resistencia de aderência à tração

Resistência a aderência à tração 7 dias (Referência)				
corpo de prova	carga (N)	Área da pastilha	Resistência (MPa) (correção)	Ruptura
cp2	356	1797,654173	0,20	chapisco/argamassa
cp5	340	1797,654173	0,19	chapisco/argamassa
cp6	389	1797,654173	0,22	substrato/chapisco
cp9	366	1797,654173	0,20	chapisco/argamassa
cp12	485	1797,654173	0,27	chapisco/argamassa
cp15	336	1797,654173	0,19	substrato/chapisco
cp18	518	1797,654173	0,29	chapisco/argamassa
cp19	613	1797,654173	0,34	chapisco/argamassa
cp22	465	1797,654173	0,26	chapisco/argamassa
cp24	350	1797,654173	0,19	chapisco/argamassa
média	421,80	1797,65	<b>0,23</b>	
Resistência a aderência à tração 14 dias				
corpo de prova	carga (N)	Área da pastilha	Resistência (MPa) (correção)	Ruptura
cp2	616	1797,654173	0,34	chapisco/argamassa
cp4	496	1797,654173	0,28	chapisco/argamassa
cp6	430	1797,654173	0,24	chapisco/argamassa
cp9	394	1797,654173	0,22	chapisco/argamassa
cp10	437	1797,654173	0,24	chapisco/argamassa
cp12	658	1797,654173	0,37	chapisco/argamassa
cp13	546	1797,654173	0,30	chapisco/argamassa
cp15	441	1797,654173	0,25	chapisco/argamassa
cp17	391	1797,654173	0,22	chapisco/argamassa
média	489,89	1797,65	<b>0,27</b>	
Resistência a aderência à tração 28 dias				
corpo de prova	carga (N)	Área da pastilha	Resistência (MPa) (correção)	Ruptura
cp2	797	1797,654173	0,44	chapisco/argamassa
cp4	443	1797,654173	0,25	substrato
cp5	562	1797,654173	0,31	substrato
cp6	607	1797,654173	0,34	chapisco/argamassa
cp7	765	1797,654173	0,43	chapisco/argamassa
cp9	573	1797,654173	0,32	argamassa
cp11	522	1797,654173	0,29	chapisco/argamassa
cp13	616	1797,654173	0,34	chapisco/argamassa
cp16	783	1797,654173	0,44	chapisco/argamassa
cp18	618	1797,654173	0,34	chapisco/argamassa
cp23	677	1797,654173	0,38	substrato
média	633,00	1797,65	<b>0,35</b>	

Resistência a aderência à tração 7 dias (R10)				
corpo de prova	carga (N)	Área da pastilha	Resistência (MPa) (correção)	Rupturas
cp2	311	1797,7	0,17	chapisco/argamassa
cp3	475	1797,7	0,26	chapisco/argamassa
cp4	345	1797,7	0,19	chapisco/argamassa
cp7	426	1797,7	0,24	chapisco/argamassa
cp8	280	1797,7	0,16	chapisco/argamassa
cp11	298	1797,7	0,17	chapisco/argamassa
cp12	380	1797,7	0,21	chapisco/argamassa
cp14	387	1797,7	0,22	chapisco/argamassa
cp15	380	1797,7	0,21	chapisco/argamassa
média	364,67	1797,65	<b>0,20</b>	
Resistência a aderência à tração 14 dias				
corpo de prova	carga (N)	Área da pastilha	Resistência (MPa) (correção)	Rupturas
cp2	368	1797,654173	0,20	chapisco/argamassa
cp3	268	1797,654173	0,15	chapisco/argamassa
cp4	307	1797,654173	0,17	chapisco/argamassa
cp5	474	1797,654173	0,26	chapisco/argamassa
cp6	260	1797,654173	0,14	substrato/chapisco
cp7	398	1797,654173	0,22	chapisco/argamassa
cp9	402	1797,654173	0,22	chapisco/argamassa
cp14	348	1797,654173	0,19	chapisco/argamassa
cp16	348	1797,654173	0,19	chapisco/argamassa
média	352,56	1797,65	<b>0,20</b>	
Resistência a aderência à tração 28 dias				
corpo de prova	carga (N)	Área da pastilha	Resistência (MPa) (correção)	Rupturas
cp1	436	1797,654173	0,24	chapisco/argamassa
cp2	394	1797,654173	0,22	chapisco/argamassa
cp4	302	1797,654173	0,17	chapisco/argamassa
cp6	466	1797,654173	0,26	chapisco/argamassa
cp8	257	1797,654173	0,14	substrato
média	371,00	1797,65	<b>0,21</b>	

Resistência a aderência à tração 7 dias (R15)				
corpo de prova	carga (N)	Área da pastilha	Resistência (MPa) (correção)	Rupturas
cp1	630	1797,654173	0,35	chapisco/argamassa
cp2	718	1797,654173	0,40	argamassa
cp3	659	1797,654173	0,37	chapisco/argamassa
cp4	705	1797,654173	0,39	chapisco/argamassa
cp5	671	1797,654173	0,37	chapisco/argamassa
cp6	568	1797,654173	0,32	argamassa
cp9	561	1797,654173	0,31	chapisco/argamassa
cp10	496	1797,654173	0,28	chapisco/argamassa
cp11	639	1797,654173	0,36	chapisco/argamassa
cp12	589	1797,654173	0,33	chapisco/argamassa
cp13	463	1797,654173	0,26	chapisco/argamassa
média	609,00	1797,65	0,34	
Resistência a aderência à tração 14 dias (R15)				
corpo de prova	carga (N)	Área da pastilha	Resistência (MPa) (correção)	Rupturas
cp3	444	1797,654173	0,25	chapisco/argamassa
cp5	689	1797,654173	0,38	chapisco/argamassa
cp8	515	1797,654173	0,29	chapisco/argamassa
cp11	482	1797,654173	0,27	chapisco/argamassa
cp13	749	1797,654173	0,42	chapisco/argamassa
cp15	690	1797,654173	0,38	chapisco/argamassa
cp17	799	1797,654173	0,44	chapisco/argamassa
média	624,00	1797,65	0,35	
Resistência a aderência à tração 28 dias (R15)				
corpo de prova	carga (N)	Área da pastilha	Resistência (MPa) (correção)	Rupturas
cp1	708	1797,654173	0,39	substrato/chapisco
cp3	824	1797,654173	0,46	substrato/chapisco
cp5	671	1797,654173	0,37	substrato/chapisco
cp6	755	1797,654173	0,42	chapisco/argamassa
cp7	500	1797,654173	0,28	chapisco/argamassa
cp8	586	1797,654173	0,33	substrato/chapisco
cp9	526	1797,654173	0,29	chapisco/argamassa
cp10	765	1797,654173	0,43	chapisco/argamassa
cp11	771	1797,654173	0,43	substrato/chapisco
cp12	508	1797,654173	0,28	substrato/chapisco
cp13	643	1797,654173	0,36	chapisco/argamassa
cp15	464	1797,654173	0,26	chapisco/argamassa
cp16	636	1797,654173	0,35	substrato/chapisco
média	642,85	1797,65	0,36	

Resistência a aderência à tração 7 dias (R20)				
corpo de prova	carga (N)	Área da pastilha	Resistência (MPa) (correção)	Rupturas
novo 1	253	1797,654173	0,14	chapisco/argamassa
novo 2	230	1797,654173	0,13	argamassa
novo 3	296	1797,654173	0,16	chapisco/argamassa
novo 8	359	1797,654173	0,20	argamassa
novo 9	327	1797,654173	0,18	argamassa
novo 10	300	1797,654173	0,17	chapisco/argamassa
novo 13	344	1797,654173	0,19	substrato/chapisco
novo 14	257	1797,654173	0,14	chapisco/argamassa
novo 15	283	1797,654173	0,16	substrato/chapisco
novo 16	262	1797,654173	0,15	substrato/chapisco
novo 17	369	1797,654173	0,21	substrato/chapisco
novo 19	300	1797,654173	0,17	substrato/chapisco
média	298,33	1797,65	0,17	
Resistência a aderência à tração 14 dias				
corpo de prova	carga (N)	Área da pastilha	Resistência (MPa) (correção)	Rupturas
NOVO1	437	1797,654173	0,24	chapisco/argamassa
NOVO6	427	1797,654173	0,24	substrato/chapisco
NOVO8	332	1797,654173	0,18	chapisco/argamassa
NOVO9	388	1797,654173	0,22	chapisco/argamassa
NOVO10	464	1797,654173	0,26	chapisco/argamassa
NOVO11	508	1797,654173	0,28	chapisco/argamassa
NOVO13	374	1797,654173	0,21	chapisco/argamassa
NOVO14	397	1797,654173	0,22	chapisco/argamassa
NOVO15	482	1797,654173	0,27	substrato/chapisco
NOVO16	425	1797,654173	0,24	chapisco/argamassa
NOVO17	402	1797,654173	0,22	chapisco/argamassa
NOVO18	580	1797,654173	0,32	chapisco/argamassa
NOVO19	537	1797,654173	0,30	chapisco/argamassa
NOVO20	474	1797,654173	0,26	chapisco/argamassa
NOVO21	402	1797,654173	0,22	chapisco/argamassa
média	441,93	1797,65	0,25	
Resistência a aderência à tração 28 dias				
corpo de prova	carga (N)	Área da pastilha	Resistência (MPa) (correção)	Rupturas
cp13	485	1797,654173	0,27	chapisco/argamassa
cp15	395	1797,654173	0,22	chapisco/argamassa
cp16	605	1797,654173	0,34	chapisco/argamassa
cp18	405	1797,654173	0,23	substrato/chapisco
cp24	483	1797,654173	0,27	substrato/chapisco
cp25	606	1797,654173	0,34	substrato/chapisco
cp26	401	1797,654173	0,22	substrato/chapisco
cp29	546	1797,654173	0,30	chapisco/argamassa

cp30	426	1797,654173	0,24	chapisco/argamassa
média	483,56	1797,65	0,27	

### Calorimetria semi-adiabática

calorimetria							
	Referência	10% Com resíduo	10% sem resíduo	15% com resíduo	15% sem resíduo	20% com resíduo	20% sem resíduo
Tempo	média	média	média	média	média	média	média
Minutos	RF	R10	SEM R10	R15	SEM R15	R20	SEM R20
0	21,43	21,43	21,43	21,43	21,43	21,43	21,43
10	21,55	21,16	21,35	21,50	21,12	21,24	21,18
20	21,65	20,87	21,29	21,53	21,12	21,18	21,12
30	21,73	20,78	21,31	21,66	21,08	21,24	21,10
40	21,75	20,69	21,30	21,83	21,20	21,13	20,96
50	21,83	20,61	21,36	21,94	21,31	21,09	20,90
60	22,01	20,53	21,41	22,03	21,34	21,01	20,79
70	22,15	20,47	21,48	22,16	21,37	20,88	20,75
80	22,24	20,43	21,56	22,18	21,46	20,82	20,72
90	22,44	20,38	21,62	22,29	21,54	20,74	20,73
100	22,49	20,34	21,64	22,40	21,59	20,70	20,75
110	22,64	20,33	21,71	22,40	21,62	20,71	20,77
120	22,79	20,31	21,80	22,53	21,68	20,77	20,95
130	22,85	20,31	21,86	22,56	21,77	20,78	20,94
140	22,95	20,32	21,93	22,66	21,80	20,81	20,92
150	23,08	20,33	22,01	22,72	21,84	20,89	20,95
160	23,34	20,38	22,11	22,76	21,92	20,92	21,01
170	23,46	20,44	22,22	22,91	22,02	20,98	21,08
180	23,57	20,50	22,36	22,94	22,09	21,05	21,18
190	23,71	20,56	22,48	23,05	22,16	21,13	21,27
200	23,88	20,62	22,62	23,16	22,24	21,24	21,38
210	24,13	20,70	22,74	23,28	22,28	21,30	21,48
220	24,37	20,80	22,85	23,38	22,42	21,44	21,59
230	24,49	20,84	23,01	23,50	22,58	21,52	21,71
240	24,66	20,89	23,15	23,66	22,65	21,62	21,82
250	24,85	20,89	23,16	23,76	22,82	21,89	21,94
260	25,06	20,99	23,28	23,87	22,99	21,83	22,05
270	25,27	21,09	23,42	24,00	23,13	21,89	22,22
280	25,47	21,23	23,62	24,15	23,30	22,14	22,41
290	25,68	21,40	23,86	24,25	23,42	22,10	22,46
300	25,88	21,49	24,03	24,36	23,63	22,16	22,52

310	26,07	21,59	24,16	24,50	23,75	22,43	22,61
320	26,25	21,56	24,19	24,61	23,87	22,39	22,71
330	26,42	21,70	24,34	24,71	24,01	22,41	22,81
340	26,59	21,76	24,43	24,85	24,15	22,70	22,91
350	26,76	21,77	24,52	24,99	24,32	22,69	23,00
360	26,93	21,82	24,68	25,07	24,41	22,66	23,09
370	27,09	21,82	24,71	25,20	24,59	22,75	23,18
380	27,25	21,95	24,88	25,35	24,68	22,96	23,26
390	27,40	21,88	24,85	25,41	24,78	22,89	23,34
400	27,54	21,88	24,92	25,56	24,91	22,87	23,42
410	27,68	21,86	24,96	25,66	25,04	23,09	23,49
420	27,82	21,88	25,00	25,75	25,17	23,04	23,56
430	27,93	21,93	25,08	25,88	25,28	22,98	23,61
440	28,05	21,99	25,17	25,95	25,41	23,10	23,66
450	28,17	22,04	25,27	26,05	25,51	23,12	23,71
460	28,28	22,11	25,37	26,15	25,62	22,99	23,74
470	28,38	22,19	25,49	26,19	25,72	23,01	23,76
480	28,48	22,35	25,71	26,33	25,81	23,09	23,78
490	28,57	22,33	25,74	26,36	25,90	22,93	23,79
500	28,65	22,34	25,78	26,42	25,98	22,85	23,78
510	28,73	22,36	25,81	26,51	26,06	22,95	23,77
520	28,80	22,36	25,82	26,51	26,14	22,79	23,75
530	28,86	22,38	25,85	26,58	26,20	22,68	23,72
540	28,92	22,39	25,88	26,59	26,25	22,79	23,69
550	28,97	22,39	25,90	26,59	26,30	22,61	23,64
560	29,01	22,40	25,91	26,64	26,34	22,47	23,59
570	29,04	22,41	25,94	26,58	26,36	22,43	23,54
580	29,06	22,57	26,10	26,63	26,37	22,42	23,48
590	29,07	22,45	26,02	26,56	26,38	22,25	23,42
600	29,07	22,38	25,96	26,53	26,37	22,15	23,35
610	29,07	22,32	25,90	26,48	26,35	22,20	23,29
620	29,05	22,25	25,82	26,44	26,33	22,02	23,21
630	29,04	22,20	25,76	26,40	26,30	21,89	23,15
640	29,00	22,16	25,71	26,36	26,26	21,92	23,07
650	28,96	22,11	25,65	26,32	26,21	21,80	22,99
660	28,91	22,06	25,59	26,29	26,16	21,66	22,92
670	28,86	22,02	25,54	26,25	26,10	21,61	22,85
680	28,80	21,97	25,48	26,22	26,04	21,62	22,77
690	28,73	21,91	25,42	26,18	25,97	21,45	22,69
700	28,66	21,86	25,35	26,14	25,90	21,33	22,61
710	28,59	21,81	25,29	26,10	25,82	21,38	22,54
720	28,51	21,75	25,23	26,06	25,73	21,25	22,47
730	28,43	21,69	25,15	26,01	25,66	21,11	22,39
740	28,34	21,63	25,09	26,05	25,57	21,07	22,31
750	28,25	21,57	25,03	26,04	25,49	21,06	22,24

760	28,17	21,52	24,96	25,97	25,41	20,91	22,17
770	28,07	21,60	25,04	25,86	25,32	20,80	22,09
780	27,98	21,52	24,97	25,83	25,24	20,86	22,03
790	27,89	21,41	24,86	25,71	25,15	20,71	21,96
800	27,80	21,30	24,76	25,64	25,06	20,60	21,89
810	27,70	21,20	24,64	25,59	24,98	20,59	21,83
820	27,61	21,12	24,53	25,44	24,89	20,58	21,76
830	27,51	21,05	24,44	25,43	24,81	20,43	21,70
840	27,42	20,98	24,37	25,27	24,72	20,33	21,63
850	27,32	20,92	24,30	25,29	24,64	20,40	21,57
860	27,23	20,86	24,23	25,12	24,56	20,28	21,51
870	27,14	20,80	24,17	25,10	24,48	20,16	21,44
880	27,07	20,74	24,11	24,97	24,40	20,08	21,39
890	26,99	20,68	24,05	24,98	24,32	20,18	21,33
900	27,03	20,63	23,99	24,93	24,24	20,03	21,27
910	26,94	20,57	23,93	24,72	24,16	19,92	21,21
920	26,91	20,52	23,87	24,69	24,09	19,91	21,15
930	26,78	20,46	23,81	24,61	24,01	19,94	21,25
940	26,81	20,46	23,81	24,50	23,94	19,78	21,33
950	26,64	20,53	23,88	24,39	23,87	19,97	21,29
960	26,66	20,40	23,77	24,29	23,80	20,03	21,23
970	26,55	20,30	23,69	24,19	23,72	20,00	21,19
980	26,50	20,21	23,59	24,10	23,65	19,90	21,11
990	26,47	20,13	23,49	23,97	23,59	19,74	21,02
1000	26,40	20,07	23,42	23,88	23,52	19,68	20,95
1010	26,40	20,02	23,36	23,82	23,46	19,61	20,88
1020	26,39	19,96	23,30	23,66	23,41	19,61	20,84
1030	26,31	19,91	23,25	23,64	23,36	19,56	20,76
1040	26,22	19,87	23,21	23,52	23,36	19,40	20,69
1050	26,09	19,82	23,16	23,43	23,38	19,29	20,62
1060	26,03	19,78	23,11	23,38	23,29	19,33	20,56
1070	26,00	19,74	23,07	23,26	23,30	19,24	20,50
1080	25,92	19,70	23,03	23,26	23,23	19,04	20,44
1090	25,70	19,74	23,07	23,18	23,33	19,02	20,37
1100	25,72	19,80	23,14	23,06	23,20	18,97	20,31
1110	25,56	19,68	23,03	23,06	23,25	18,88	20,20
1120	25,63	19,58	22,95	22,97	23,13	18,86	20,15
1130	25,48	19,51	22,88	22,89	23,25	19,00	20,09
1140	25,47	19,45	22,80	22,78	23,10	18,80	20,05
1150	25,40	19,39	22,74	22,79	23,22	18,85	20,03
1160	25,36	19,35	22,69	22,74	23,12	18,75	19,99
1170	25,39	19,31	22,64	22,69	23,09	18,66	20,01
1180	25,30	19,27	22,60	22,58	23,04	18,65	19,85
1190	25,26	19,24	22,57	22,50	23,08	18,51	19,78
1200	25,23	19,21	22,54	22,44	23,06	18,22	19,70

1210	25,20	19,20	22,53	22,27	22,96	18,29	19,71
1220	25,15	19,30	22,64	22,16	22,98	18,18	19,59
1230	25,21	19,20	22,56	22,12	22,89	18,28	19,57
1240	25,11	19,13	22,50	22,10	22,91	18,10	19,53
1250	25,06	19,06	22,43	22,10	22,90	18,17	19,41
1260	25,01	19,00	22,35	22,11	22,79	18,20	19,51
1270	24,91	19,03	22,36	22,11	22,73	18,20	19,44
1280	24,85	19,04	22,39	22,14	22,67	18,16	19,36
1290	24,82	18,95	22,32	22,17	22,58	18,18	19,33
1300	24,64	18,90	22,27	22,20	22,51	18,13	19,24
1310	24,73	18,85	22,21	22,25	22,43	18,22	19,16
1320	24,59	18,91	22,27	22,33	22,37	18,11	19,21
1330	24,50	18,87	22,24	22,58	22,36	18,05	19,13
1340	24,50	18,96	22,33	22,64	22,29	18,03	18,94
1350	24,58	18,89	22,23	22,60	22,17	18,08	18,94
1360	24,45	18,76	22,11	22,57	22,19	18,14	18,84
1370	24,53	18,69	22,04	22,53	22,10	18,07	18,86
1380	24,49	18,64	22,00	22,49	22,10	17,94	18,81
1390	24,40	18,67	22,02	22,45	21,98	18,16	18,84
1400	24,37	18,68	22,05	22,44	21,96	18,02	18,77
1410	24,46	18,71	22,09	22,36	21,88	18,06	18,67
1420	24,45	18,66	22,04	22,31	21,81	18,06	18,61
1430	24,37	18,56	21,93	22,27	21,86	17,97	18,61