

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO**  
Centro Tecnológico  
Departamento de Engenharia Civil

AMANDA JANUARIO FERRI  
MYLENA LAKTIM ROSA

**ANÁLISE DO USO DE RESÍDUO DE BENEFICIAMENTO DE  
ROCHA ORNAMENTAL NA PRODUÇÃO DE GRAUTE PARA  
ALVENARIA ESTRUTURAL**

Vitória, março de 2022

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO**  
Centro Tecnológico  
Departamento de Engenharia Civil

AMANDA JANUARIO FERRI  
MYLENA LAKTIM ROSA

**ANÁLISE DO USO DE RESÍDUO DE BENEFICIAMENTO DE  
ROCHA ORNAMENTAL NA PRODUÇÃO DE GRAUTE PARA  
ALVENARIA ESTRUTURAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal Do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil. Orientadora: Prof. Dr<sup>a</sup>. Rudiele Aparecida Schankoski

Vitória, março de 2022

AMANDA JANUARIO FERRI  
MYLENA LAKTIM ROSA

# **ANÁLISE DO USO DE RESÍDUO DE BENEFICIAMENTO DE ROCHA ORNAMENTAL NA PRODUÇÃO DE GRAUTE PARA ALVENARIA ESTRUTURAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal Do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em 28/03/2022

## **COMISSÃO EXAMINADORA**

---

**Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Rudiele Aparecida Schankoski**  
**Universidade Federal do Espírito Santo**  
**Orientadora**

---

**Prof. Dr. Ronaldo Pilar**  
**Universidade Federal do Espírito Santo**  
**Coorientador**

---

**Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Sayonara Maria de Moraes Pinheiro**  
**Universidade Federal do Espírito Santo**  
**Examinador**

---

**Eng. Civil Otávio Gaigher Simões**  
**Universidade Federal do Espírito Santo**  
**Examinador**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos primeiramente à Deus por estar conosco em cada segundo dessa jornada, nos dando força, garra e determinação para vencer todos os obstáculos.

Aos nossos pais, agradecemos pelo apoio, paciência e compreensão diante de todas as dificuldades.

Aos grandes amigos, pelo imensurável suporte, pelos ótimos momentos compartilhados e por tornarem os nossos dias mais leves e alegres.

À professora Dr<sup>a</sup>. Rudiele, por ser excepcional, e por todo incentivo, dedicação e preocupação. Agradecemos também por não medir esforços para contribuir com nosso aprendizado e com o andamento da pesquisa.

Ao professor Dr. Ronaldo e à banca, agradecemos pela orientação e por colaborar com o estudo de forma enriquecedora.

Aos laboratoristas do LEMAC, por toda ajuda e suporte no decorrer dos ensaios.

Aos professores da UFES, por todo conhecimento compartilhado durante os anos de graduação e por contribuir grandemente com a nossa formação.

FERRI, A. J.; ROSA, M. L.; **Análise do uso de resíduo de beneficiamento de rocha ornamental na produção de graute para alvenaria estrutural**. 93 f. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Federal do Espírito Santo. 2022.

## RESUMO

A geração desenfreada de resíduos provenientes do beneficiamento de rochas ornamentais, principalmente no estado do Espírito Santo, é um problema ambiental de grande importância que até o momento não possui solução produtora. Além disso, o setor da construção civil cresce mais a cada dia, e os impactos à natureza gerados por ele aumentam no mesmo ritmo. Dessa forma, o presente trabalho objetiva estudar o uso desses resíduos na produção de graute para alvenaria estrutural, além da consequente diminuição de danos ambientais causados por esse setor. Para isso foram dosados seis traços diferentes, três deles contendo tanto o aditivo superplastificante quanto o aditivo redutor de retração, fazendo a substituição em volume de areia por resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO) nos teores de 0%, 5% e 10%; e os outros três traços contendo apenas o aditivo superplastificante, variando as porcentagens de substituição da mesma forma. A análise foi feita por meio de ensaios para verificação das propriedades de cada traço no estado fresco – massa específica, trabalhabilidade (Flow Table) e viscosidade (Funil V) – e também no estado endurecido – resistência à compressão e variação dimensional. Dessa forma, foi possível comparar as características dos grautes dosados e suas propriedades necessárias para uso em alvenaria estrutural. Os resultados no estado fresco mostraram pouca variação da massa específica, além de indicar que quanto maior o teor de resíduo, maior a viscosidade e menor é a fluidez do graute. Para o estado endurecido, os valores de resistência à compressão das misturas contendo RBRO, aos 7 dias e aos 28 dias, não apresentaram diminuição se comparadas à mistura referência. Além disso, o ensaio de variação dimensional mostrou que todos os traços contendo aditivo redutor de retração expandiram, mesmo com o uso do RBRO. Com isso, concluiu-se que os resultados foram satisfatórios, tornando a adição do resíduo viável para essa aplicação. O estudo indicou também a existência de um teor ótimo, já que os parâmetros para as misturas de 5% de RBRO foram melhores se comparados aos parâmetros das misturas com 10% de RBRO.

Palavras-chave: graute; resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais.

FERRI, A. J.; ROSA, M. L.; **Análise do uso de resíduo de beneficiamento de rocha ornamental na produção de graute para alvenaria estrutural**. 93 f. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Federal do Espírito Santo. 2022.

### **ABSTRACT**

The rampant waste generation from ornamental rocks extraction, mainly in the Espírito Santo, is an environmental problem of great importance that has no solution until now. Furthermore, the construction sector grows more every day, and the nature impacts generated by it grow in the same rhythm. That way, this work aims to study the use of granite extraction waste in the production of grout for structural masonry, in addition to the consequent damage reduction caused by constructions. For that, six different mixtures were measured, three containing superplasticizer additive and shrinkage reducing additive, replacing sand, in volume, with granite extraction waste (GEW) in the contents of 0%, 5% and 10%; and the others three mixtures containing only the superplasticizer additive, varying the replacing percentages in the same way. The analysis was done by means of testing to verify each mixture fresh state properties – specific mass, spread on flow table and flow time of the funnel V – and hardened state - compression resistance and dimensional variation. Thus, it was possible compare the measured mixtures characteristics and the needed properties for their using in structural masonry. The results in the fresh state showed a little variation of specific mass, in addition to indicating that the higher the GEW content, higher is the flow time and smaller is the flow of the grout. About the hardened state, the values of compressive resistance for mixtures containing addition of GEW, at 7 days and at 28 days, they didn't show decrease comparing with reference mixture. Moreover, the dimensional variation test showed that every mixture containing shrinkage reducing additive expanded, even with the use of GEW. Therefore, it was concluded that results were satisfactory, making the GEW addition viable for this application. The study also indicated the existence of some great content, since the parameters for the mixtures containing 5% of GEW were better containing 10% of GEW.

Key words: grout; ornamental rock beneficiation waste.

## LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1- Curva de resistência versus relação água/cimento.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 2- Moldagem de corpos de prova prismáticos para graute. ....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 3 - Traços propostos pelo estudo.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 4 - Composições de graute utilizando resíduo de vidro .....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 5 - Resultados do ensaio de mini slump e ensaio de cone .....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 6 - Proporcionamento dos traços de graute .....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 7 - Exportações de Rochas Ornamentais em maio de 2021 .....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 8 - Resíduo de Rochas Ornamentais .....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 9 - Análise MEV de RBRO .....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 10 - Distribuição granulométrica do resíduo de rocha ornamental .....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 11 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão e resistência à flexão.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 12 - Aditivo superplastificante. ....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 13 - Aditivo redutor de retração.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 14 - Areia quartzosa utilizada no graute.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 15 - Curva granulométrica da areia.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 16 - Amostra de resíduo de beneficiamento de granito preparada para uso..</i>	<i>45</i>
<i>Figura 17 - Frasco de Le Chatelier usado no ensaio.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 18 - Água sendo colocada no Frasco de Le Chatelier .....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 19 - Volume final de água + resíduo .....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 20 – Equipamentos para realização do ensaio de finura Blaine.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 21 - Aparato utilizado no ensaio de finura Blaine .....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 22 - Misturas sem aditivo redutor de retração.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 23 - Misturas com aditivo redutor de retração.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 24 - Materiais separados para produção dos grautes .....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 25 - Argamassadeira utilizada para a produção dos grautes. ....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 26 - Preenchimento do tronco de cone .....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 27 - Dimensões funil V (em centímetros) .....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 28 - Funil V.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 29 - Preenchimento do funil V.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 30 - Recipiente contendo graute para determinação da massa específica....</i>	<i>60</i>

<i>Figura 31 - Alguns dos corpos de provas cilíndricos usados no ensaio de resistência à compressão.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 32 - Corpos de prova moldados e identificados .....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 33 - Moldes prismáticos preparados para moldagem .....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 34 - Parte dos corpos de prova prismáticos após moldagem.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 35 - Corpos de prova prismáticos desmoldados e identificados. ....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 36 - Corpos de prova desmoldados e identificados .....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 37 - Calibração do equipamento .....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 38 - Leitura de um dos corpos de prova.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 39 - Resultados de leitura média do flow table para os seis traços.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 40 - Espalhamento dos grautes com aditivo redutor de retração (REF+RR, 5% RBRO+RR e 10% RBRO+RR).....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 41 - Espalhamento dos grautes sem aditivo redutor de retração (REF, 5% RBRO e 10% RBRO) .....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 42 - Resultados de tempo de escoamento no funil V.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 43 - Resultados de massa específica de cada traço.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 44 - Gráfico da variação dimensional versus idade para traço Referência +RR .....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 45 - Gráfico da variação dimensional versus idade para traço 5% RBRO + RR .....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 46 - Gráfico da variação dimensional versus idade para traço 10% RBRO + RR.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 47 - Gráfico com a média de variação dimensional sofrida por cada traço para fins de comparação.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 48 - Gráfico comparativo contendo os resultados de resistência à compressão aos 7 e 28 dias para cada traço .....</i>	<i>80</i>

## LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1 - Propriedades do cimento usado.....</i>	<i>41</i>
<i>Tabela 2 - Dados da pesagem inicial .....</i>	<i>46</i>
<i>Tabela 3 - Dados para cálculo da massa específica .....</i>	<i>48</i>
<i>Tabela 4 - Dados obtidos com o ensaio de finura Blaine .....</i>	<i>52</i>
<i>Tabela 5 - Quantidade de material para a produção de 1 m<sup>3</sup> da mistura, em quilos. ....</i>	<i>54</i>
<i>Tabela 6 - Leituras e variações dimensionais calculadas (traço referência + aditivo reductor de retração).....</i>	<i>91</i>
<i>Tabela 7 - Leituras e variações dimensionais calculadas (traço 5% + aditivo reductor de retração) .....</i>	<i>92</i>
<i>Tabela 8 - Leituras e variações dimensionais calculadas (traço 5% + aditivo reductor de retração) .....</i>	<i>93</i>

## **LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM - American Society for Testing and Materials

CP – Cimento Portland

CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

LEMAC - Laboratório de Ensaios em Materiais de Construção

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

NBR – Norma Brasileira

NM – Norma Mercosul

PIB – Produto Interno Bruto

RBRO – Resíduo de Beneficiamento de Rocha Ornamental

RR – Redutor de Retração

UFES – Universidade Federal do Espírito Santo

WGP – Waste Glass Powder

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
1.1 OBJETIVOS.....	14
1.1.1 OBJETIVO GERAL .....	14
1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	14
1.2 JUSTIFICATIVA.....	14
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>16</b>
2.1 ALVENARIA ESTRUTURAL .....	16
2.1.1 DEFINIÇÃO .....	16
2.1.2 HISTÓRICO .....	17
2.1.3 VANTAGENS E DESVANTAGENS .....	17
2.1.4 QUALIDADE E CONTROLE TECNOLÓGICO .....	18
2.2.1 BLOCOS.....	19
2.2.2 BLOCOS DE CONCRETO .....	19
2.2.3 BLOCOS CERÂMICOS .....	19
2.2.4 ARGAMASSAS.....	20
2.2.5 ARMADURAS.....	20
2.2.6 GRAUTES .....	21
2.3 GRAUTES PARA ALVENARIA ESTRUTURAL .....	21
2.3.1 MATERIAIS E DOSAGEM.....	21
2.3.2 PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO .....	24
2.3.3 PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO .....	25
2.3.4 O PAPEL DO GRAUTE NA ALVENARIA ESTRUTURAL .....	26
2.4 ADIÇÕES MINERAIS EM GRAUTES .....	27
2.5 RESÍDUO DE BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS.....	31
2.5.1 INDÚSTRIA DE ROCHAS .....	31
2.5.2 CARACTERÍSTICAS DOS RBRO .....	33

2.5.3 USO DE RBRO EM MATRIZES CIMENTÍCIAS .....	36
2.5.4 USO DE RBRO EM GRAUTE .....	39
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>41</b>
3.1 MATERIAIS.....	41
3.1.1 CIMENTO .....	41
3.1.2 ADITIVO .....	42
3.1.3 AGREGADO MIÚDO .....	43
3.1.4 RESÍDUO DE BENEFICIAMENTO DE ROCHA ORNAMENTAL (RBRO) .....	45
3.2 MÉTODOS.....	52
3.2.1 TRAÇOS UTILIZADOS.....	52
3.2.2 CONFECÇÃO DOS GRAUTES.....	53
3.2.3 PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO .....	56
3.2.4 PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO .....	62
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>70</b>
4.1 PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO.....	70
4.2 PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO.....	75
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>82</b>
5.1 CONCLUSÕES .....	82
<b>6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>84</b>
<b>7. REFERÊNCIAS.....</b>	<b>85</b>
<b>APÊNDICE A – DADOS DO ENSAIO DE VARIAÇÃO DIMENSIONAL .....</b>	<b>91</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A construção civil vem crescendo significativamente ao longo dos anos, assim como a evolução tecnológica do setor. Esse crescimento resulta em desenvolvimento econômico para o país, impacta o PIB e promove a geração de empregos e renda. Porém, todo esse avanço vem acompanhado de uma preocupação: o impacto ambiental gerado por este setor.

Apesar do progresso da sustentabilidade na construção, como o avanço de estudos na área com viés ambiental, construções mais sustentáveis e iniciativas que visam a diminuição dos impactos gerados, a preocupação ainda existe. Dentre os impactos ambientais que podem ser causados pelo setor da construção civil estão a poluição (sonora e ambiental), emissão de gases do efeito estufa, uso de recursos naturais, desperdícios e geração de resíduos.

Um dos resíduos gerados pela construção civil, abordado neste trabalho, é o resíduo de beneficiamento de rocha ornamental (RBRO). O setor de rochas, em seu processo de extração e beneficiamento, produz, em todas as etapas, uma quantidade significativa de resíduos sólidos, correspondentes a uma faixa 65% a 75% de perda (CAMPOS, *et al*, 2007).

O Brasil e, principalmente, o Espírito Santo possuem expressiva participação no setor de rochas. De acordo com o SINDIROCHAS (2021), o estado do Espírito Santo foi responsável por quase 85% da exportação de rochas ornamentais no ano. Tendo em vista essa atuação relevante no setor, a preocupação ambiental e a legislação vigente, encontrar uma solução sustentável para o reaproveitamento desse resíduo é muito importante.

O uso do resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais em matrizes cimentícias já é objeto de muitos estudos. Como exemplos, Teixeira *et al* (2018) aplicaram o resíduo em pastas cimentícias; Arpini (2021) estudou o efeito do RBRO em argamassas autoadensáveis e Vazzoler *et al* (2018) utilizaram como material pozolânico.

O avanço de estudos como estes citados permite que sejam encontradas soluções para a destinação dos resíduos gerados, reduzindo o impacto ambiental

gerado pelo setor de rochas e pela construção civil e evoluindo cada vez mais para construções mais sustentáveis.

Este trabalho é parte de uma série de pesquisas desenvolvidas na UFES voltadas para o uso de resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais em matrizes cimentícias. Nesse estudo, será analisada a utilização do RBRO em grautes para alvenaria estrutural, buscando aumentar as possibilidades para solução da problemática ambiental abordada. O reaproveitamento do resíduo está associado ao conceito de economia circular na construção civil, permitindo a evolução mais sustentável do setor.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste estudo consiste em analisar e avaliar a utilização do resíduo de beneficiamento de rocha ornamental na produção de grautes aplicados em alvenaria estrutural, visando a diminuição dos impactos ambientais referentes a esse resíduo.

### 1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Com relação aos objetivos específicos, são eles:

- Determinar e analisar as propriedades dos materiais utilizados para a produção das misturas, inclusive do RBRO;
- Determinar e analisar as propriedades do estado fresco dos grautes produzidos com RBRO;
- Determinar e analisar as propriedades do estado endurecido (resistência à compressão e variação dimensional) dos grautes produzidos com RBRO.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

O uso de RBRO na produção de graute para alvenaria estrutural justifica-se pelo fato de que há uma produção exacerbada desse material no processo de extração de rochas ornamentais no Brasil, principalmente no sul do Espírito Santo, o

que acaba sendo um problema ambiental grave e enfatiza a importância de encontrar uma destinação adequada para esse resíduo no estado.

Além disso, por ser um micro concreto muito fluido, o graute, em sua composição, necessita da adição de finos, como forma de alcançar a estabilidade. Geralmente, adiciona-se cimento Portland, material que, pelo alto custo, encarece o graute e está envolvido em diversas problemáticas ambientais devido a emissão de gases poluentes provenientes de sua fabricação. Por ser um material fino, o emprego do RBRO justifica-se no seu potencial para promover a estabilidade do graute sem aumentar o consumo de cimento. Ainda, o graute industrializado tem o preço elevado, fazendo com que o uso do resíduo reduza o custo.

Provando ser eficaz, o uso de RBRO na composição de graute pode trazer vantagens econômicas, ainda que sutis, e sobretudo ambientais, uma vez que a própria construção civil gera impactos negativos à natureza todos os dias, e essa é uma maneira de mitigar os danos causados.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 ALVENARIA ESTRUTURAL

#### 2.1.1 DEFINIÇÃO

Camacho (2006, p. 1) define alvenaria estrutural da seguinte forma: “Conceitua-se de Alvenaria Estrutural o processo construtivo na qual, os elementos que desempenham a função estrutural são de alvenaria, sendo os mesmos projetados, dimensionados e executados de forma racional”.

Ademais, de acordo com Tauil e Nesse (2010), pilares e vigas não são utilizados nas alvenarias estruturais, embora alguns elementos de transcrição possam ser necessários em alguns casos. As próprias paredes acabam por compor a estrutura da edificação e são responsáveis por distribuir as cargas ao longo das fundações.

E ainda, segundo Cavalheiro (1998), a alvenaria estrutural é constituída basicamente pelos blocos, que são fabricados com cimento, cal, areia, argila e pedriscos; além dos compostos no estado fresco, como argamassa e o graute, e ainda, constituintes como o aço que são inseridos nos blocos conforme projeto estrutural.

Finalmente, Kato (2002) cita as principais funções que uma alvenaria estrutural deve executar:

- Resistir às cargas verticais;
- Resistir às cargas de vento;
- Resistir à impactos e cargas de ocupação;
- Isolar acústica e termicamente os ambientes;
- Prover estanqueidade à água da chuva e do ar;
- Apresentar bom desempenho a ação do fogo.

### 2.1.2 HISTÓRICO

De acordo com Mohamad (2020), há registros da existência da alvenaria estrutural há milhares de anos, baseando-se inicialmente no conhecimento empírico e na experiência dos construtores. Além disso, Mohamad (2020) também comenta que no geral a garantia de estabilidade e rigidez estruturais era o formato no qual a edificação era construída, e que essas magníficas obras ainda existem em perfeito estado de conservação comprovando o potencial, durabilidade e qualidade desse sistema construtivo.

Com o passar dos anos, houve uma evolução contínua das técnicas construtivas, mas a alvenaria estrutural nem sempre foi tida como uma alternativa para melhorar a eficiência das construções, como descreve Camacho (2006, p.5):

“Com o advento do aço e do concreto armado no início do século XX, uma revolução veio abalar a arte de construir. Juntamente com os novos materiais, que possibilitaram a construção de obras de maior porte e arrojado, surgiram também novas técnicas construtivas com embasamento científico que se desenvolveram rapidamente. Em meio a isso, a alvenaria foi relegada a um segundo plano, passando a ser usada quase que exclusivamente como elemento de fechamento.”.

Ainda de acordo com Camacho (2006), a alvenaria foi redescoberta na metade do século XX, juntamente com a necessidade de novas técnicas construtivas, e graças a esse acontecimento inúmeras pesquisas começaram a surgir, bem como as criações de normas e adoção de critérios de cálculo baseados em métodos racionalizados.

Com relação ao histórico da alvenaria estrutural no Brasil, Cavalheiro (1998) diz que esse tipo de edificação surgiu no período colonial, juntamente com a utilização da pedra, tijolo de barro cru e taipa de pilão. No Império é que se marcou a evolução da técnica construtiva, por meio do uso de tijolos de barro cozido, o que propiciou o surgimento de vãos maiores e mais resistentes à água. A racionalização e industrialização se iniciaram no século 19.

### 2.1.3 VANTAGENS E DESVANTAGENS

Segundo Mohamad (2020), este modelo de alvenaria apresenta como principal vantagem a possibilidade de economia devido a otimização das tarefas na obra, além

de maior facilidade para controlar todas as etapas de produção e também redução de desperdícios, tornando-o competitivo se comparado ao concreto armado e aço.

Além disso, ainda sobre as vantagens desse tipo de sistema construtivo, Araújo (1995, p. 2) diz que:

“A grande vantagem que a alvenaria estrutural apresenta é a possibilidade de incorporar facilmente os conceitos de racionalização, produtividade e qualidade, produzindo, ainda, construções com bom desempenho tecnológico aliado a baixos custos”.

Apesar disso, o sistema pode apresentar desvantagens. “Tem-se como principal inconveniente, a limitação do projeto arquitetônico pela concepção estrutural, que não permite a construção de obras arrojadas. Outra desvantagem é a impossibilidade de adaptação da arquitetura para um novo uso.” (CAMACHO, 2006, p. 5). E ainda, Ramalho e Corrêa (2003, p.6) acrescentam que a alvenaria estrutural acaba por exigir uma mão de obra mais qualificada, que consiga utilizar os instrumentos adequados para a execução, podendo assim exigir gastos excedentes.

#### 2.1.4 QUALIDADE E CONTROLE TECNOLÓGICO

Para a avaliação e controle das características da alvenaria estrutural, Araújo (2018) diz que o corpo de prova desse método construtivo é o prisma, que consiste na sobreposição de blocos ligados por argamassa, grauteados ou não. Nessralla (2013) acrescenta que utilizar os prismas em ensaios traz uma série de vantagens ao se comparar com as paredes em tamanho real, por apresentarem fácil manuseio, menor tempo de fabricação e menor tempo e recursos laboratoriais, além de apresentarem resultados satisfatórios.

A ABNT NBR 16868-3 (2020) determina os métodos de ensaios que devem ser utilizados para elementos em alvenaria construídos com blocos e tijolos (cerâmicos e de concreto), seja prisma, pequena parede ou parede. Os principais ensaios definidos pela norma para prismas são: resistência à compressão, resistência ao cisalhamento, resistência à flexão simples e à flexo-compressão e resistência à tração.

## 2.2 COMPONENTES DA ALVENARIA ESTRUTURAL

Segundo Dupim (2019), a alvenaria estrutural é um sistema composto por associação de elementos estruturais, sendo eles os blocos, argamassa de assentamento, graute e armadura.

### 2.2.1 BLOCOS

De acordo com a ABNT NBR 16868-2 (2020), os blocos utilizados para a composição das alvenarias estruturais devem atender as especificações da ABNT NBR 6136, para blocos de concreto, e ABNT NBR 15270-1, para blocos cerâmicos. Ainda segundo a norma, além dessas especificações, os blocos devem também estar de acordo com as resistências e outras especificações do projeto estrutural.

### 2.2.2 BLOCOS DE CONCRETO

A ABNT NBR 6136 (2016) define como um componente para alvenaria com ou sem função estrutural o bloco vazado de concreto simples. Este bloco, vazado nas faces superior e inferior, possui área líquida igual ou inferior a 75% da área bruta e é composto por cimento, agregados, água e, em algumas situações, aditivos e/ou adições.

Ainda de acordo com a norma acima, os blocos de concreto são classificados em três classes: A, B e C, sendo a classe A utilizada para níveis abaixo do solo, e as classes B e C para níveis acima do solo. Para aceitação ou rejeição do lote, a ABNT NBR 6136 (2016) estabelece as seguintes condições:

- Devem atender os requisitos de inspeção visual definidos pela norma, não apresentando trincas, fraturas e defeitos;
- Devem atender as dimensões nominais definidas em norma;
- Devem atender às características físico-mecânicas (resistência à compressão e absorção) definidas em norma.

### 2.2.3 BLOCOS CERÂMICOS

Os blocos cerâmicos podem ser definidos, de acordo com a ABNT NBR 15270-1 (2017) como um componente de alvenaria com furos ou vazados prismáticos

perpendiculares às faces que os contém. Para a aceitação ou rejeição dos blocos, a norma define que requisitos como resistência, dimensões, absorção de água, entre outros, devem ser atendidos.

Segundo Roman (2017), a qualidade dos blocos cerâmicos é diretamente influenciada pela qualidade das argilas e pelo processo de produção. Além disso, Roman diz que uma das vantagens dos blocos cerâmicos com relação aos blocos de concreto é o menor peso, o que facilita o manuseio e transporte, e também a maior flexibilidade para criação de peças especiais.

#### 2.2.4 ARGAMASSAS

Nessralla (2020) define argamassa como uma mistura que contém cimento, cal, areia, água e aditivos em alguns casos. Ainda acrescenta que as argamassas exercem influência na resistência das paredes, mesmo que sua resistência seja menor que a dos blocos.

Para as alvenarias estruturais, Roman (2017) diz que “As argamassas na Alvenaria Estrutural têm a função unir solidamente os blocos, distribuindo tensões uniformemente entre estes, além de acomodar as pequenas deformações destes componentes”. A norma ABNT NBR 16868-2 (2020) especifica que as argamassas de assentamento para alvenaria estrutural devem atender as especificações da ABNT NBR 13279 (2005). Além disso, a norma ainda diz que a aderência da argamassa com o bloco ou tijolo deve ser verificada pelos ensaios de resistência de tração na flexão do prisma, de acordo com a ABNT NBR 16868-3 (2020).

Ainda, com relação à resistência à compressão das argamassas, Parkesian (2014) recomenda que esse valor esteja dentro da faixa 0,7 a 1,5 vezes a resistência característica do bloco. A ABNT NBR 16868-1 (2020) recomenda que esse valor seja de até 1,5 vezes a resistência característica especificada para cada bloco, para evitar fissuras.

#### 2.2.5 ARMADURAS

A ABNT NBR 16868-1 (2020) classifica as alvenarias estruturais em três tipos: as alvenarias não armadas, em que não são dimensionadas armaduras para resistir a esforços solicitantes; as alvenarias armadas, em que se utilizam armaduras

passivas para resistir aos esforços solicitantes; e armaduras protendidas, em que há o uso de armadura ativa.

Segundo Camacho (2006), as armaduras utilizadas para alvenaria estrutural são as mesmas utilizadas para o concreto armado, podendo elas serem de cálculo ou construtivas. O autor ainda acrescenta que a função das armaduras na alvenaria estrutural é absorver esforços de tração e/ou compressão e cobrir necessidades construtivas.

De acordo com Parkesian (2014), as alvenarias não armadas, apesar de não possuírem armaduras para resistir a esforços, contam com armaduras construtivas de cintas, vergas e contravergas, além de armaduras para controlar a fissuração, colocadas em juntas ou canaletas horizontais.

#### 2.2.6 GRAUTES

Ramalho e Corrêa (2003) descrevem o graute como sendo um tipo de concreto relativamente fluido, com agregados de pequena dimensão que tem a função de promover a solidarização dos blocos de alvenaria estrutural. E ainda, destacam que o graute promove o aumento da capacidade portante da alvenaria à compressão, e também permite que as armaduras colocadas nos pontos de graute combatam às tensões de tração que a alvenaria sozinha não consegue resistir.

De acordo com Roman (2017), além de ser usado na solidarização da alvenaria estrutural, o graute também é largamente usado como material de enchimento em reforços estruturais. Como esse material é o foco do presente trabalho, nos próximos tópicos aspectos relacionados a ele serão melhor explanados.

### 2.3 GRAUTES PARA ALVENARIA ESTRUTURAL

#### 2.3.1 MATERIAIS E DOSAGEM

De acordo com Mohamed (2020), os principais materiais usados na fabricação do graute são: cimento, areia, pedrisco e água. Além disso, pode ser usada cal em alguns casos para diminuição da rigidez do graute.

Parkesian (2014) acrescenta sobre a utilização de aditivos em graute. Segundo ele, os aditivos podem ajudar a controlar a perda de água que ocorre do graute para o bloco, além de ajudar a reduzir o potencial aparecimento de fissuras por conta da

retração. Parkesian ainda adiciona que, geralmente, os aditivos utilizados nos grautes contêm agentes redutores de retração que ajudam a mitigar a diminuição do volume.

Ademais, sobre os agregados usados na confecção dos grautes, a ASTM C 404 (2007) prescreve que 100% (cem por cento) dos agregados grossos devem passar na peneira 12,5 mm, ou seja, os pedriscos devem ter diâmetros iguais ou inferiores a 12,5 mm. E ainda, essa norma acrescenta que não mais do que 5% (cinco por cento) dos agregados deve passar na peneira de 600  $\mu\text{m}$ .

A dosagem do graute também é um tema de grande importância a ser discutido. Bromerchenkel *et al* (2019) realizaram o proporcionamento de materiais do graute por meio de adaptação do método de dosagem para concretos do IPT/EPUSP. Primeiramente, Bromerchenkel *et al* (2019) determinaram os seguintes parâmetros do graute necessários para cálculo do traço:

- Resistência característica de 15 MPa, pois era o mínimo exigido pela norma ABNT NBR 15961 (2011);
- Dados de caracterização dos materiais usados na dosagem;
- Condição de preparo B, já que o objetivo era tentar reproduzir a realidade de obra, e o proporcionamento nessas condições era feito por meio de padiolas;
- Desvio padrão de 5,5 MPa, obtido por meio da norma ABNT NBR 12655 (2015).

As informações de resistência característica e desvio-padrão foram necessárias para obtenção do valor de resistência média ( $F_{cj}$ ) dada pela equação (1).

$$F_{cj} = F_{ck} + 1,65 \times S_d \quad (1)$$

Sendo que:

$F_{cj}$ : resistência do graute à compressão na idade de  $j$  dias, em MPa;

$F_{ck}$ : resistência característica a compressão do graute, em MPa;

$S_d$ : Desvio – padrão de dosagem, em MPa.

Com o objetivo de obter a curva de resistência do cimento, Bromerchenkel *et al* (2019) dosaram 3 (três) diferentes traços de argamassa variando a relação água/cimento. Além disso, como a intenção final dessa dosagem era chegar em um proporcionamento ideal de argamassa e posteriormente adicionar a brita, foi necessário variar também a quantidade de areia à medida que se variou a relação água/cimento. Isso foi feito, pois a consistência ideal para o graute usado em obra é de  $20 \pm 2$  cm, que por sua vez foi fixado na determinação dos traços.

Posteriormente foi realizado o ensaio de índice de consistência (ABNT NBR 13276/2016) modificado por Bromerchenkel *et al* (2019) em cada um dos traços de argamassa. Na moldagem, foram feitas 3 (três) camadas de argamassa com 10 golpes cada, e ainda, a manivela foi movida por 10 vezes provocando a queda da mesa.

Além disso, foi realizado o ensaio de massa específica, e na sequência a moldagem dos corpos de prova para a obtenção da resistência à compressão de 28 dias. E, por fim, de posse dos resultados de resistência para cada relação água/cimento, Bromerchenkel *et al* (2019) realizaram o ajuste por mínimos quadrados da Lei de Abrams, equação (2), e Lei de Lyse, equação (3).

$$f_c = \frac{k_1}{k_1^{(a/c)}} \quad (2)$$

$$m = k_3 + k_4 \times (a/c) \quad (3)$$

Sendo que:

$k_1, k_2, k_3$  e  $k_4$  são constante;

$a/c$  : relação água cimento;

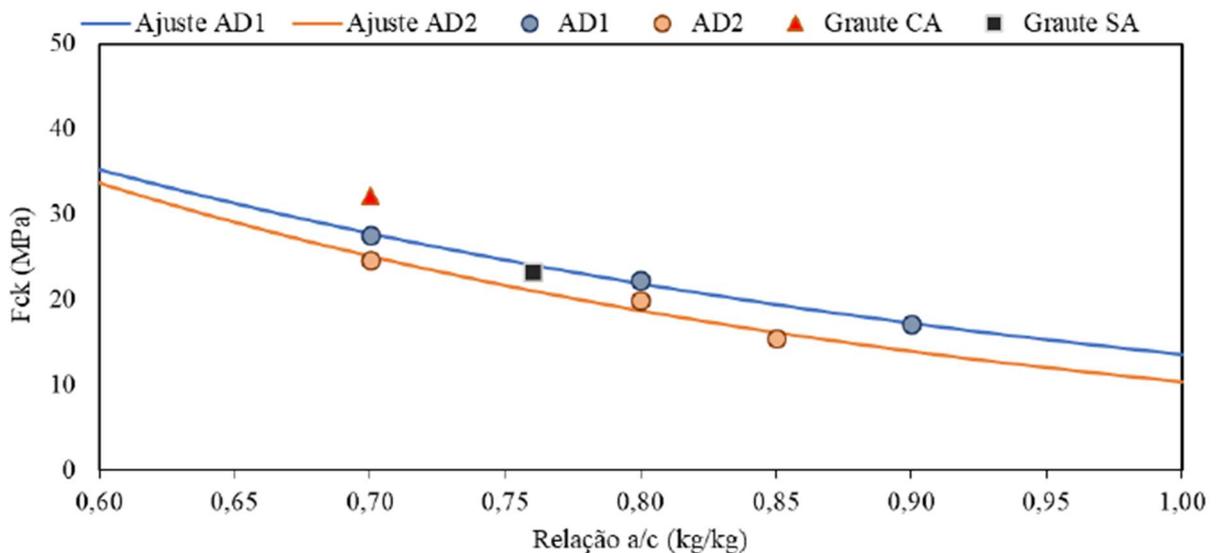
$f_c$  : resistência à compressão, em Mpa;

$m$  : teor de agregado (areia).

Bromerchenkel *et al* (2019) traçaram as curvas de dosagem, resistência *versus* relação água/cimento, como pode ser observado na Figura 1. Foram utilizados dois

tipos de aditivos plastificantes nesse estudo (AD1 e AD2). O Graute CA é o graute contendo o aditivo AD1 e o Graute AS é o graute sem aditivo. Dessa forma, tornou-se possível realizar diversos ajustes no traço da argamassa, além de poder inferir que um dos aditivos apresentou desempenho superior ao outro, ou seja, a resistência da mistura que continha o aditivo 1 (ADI-PLAST 20P) teve resistência à compressão, em média, 30% superior à que continha o aditivo 2 (ADI-PLAST 40P).

Figura 1- Curva de resistência versus relação água/cimento



Fonte: Bromerchenkel *et al* (2019)

De posse dos resultados, Bromerchenkel *et al* (2019) puderam definir o aditivo e o traço de melhor desempenho para a finalidade do estudo, e então a quantidade de brita (agregado graúdo) pôde ser finalmente otimizada e adicionada à mistura para a confecção do concreto.

### 2.3.2 PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO

Roman (2017) diz que o graute no estado fresco deve apresentar consistência coesa e fluidez suficiente para o completo preenchimento dos vazios existentes nos pontos de grauteamento previstos no projeto estrutural.

Além disso, de acordo com Ramalho e Corrêa (2003), a importância da fluidez do graute se deve à necessidade de que o conjunto formado por bloco, graute e armadura, trabalhe de forma monolítica, como uma estrutura única, portanto, ele precisa ter facilidade para preenchimento dos vazios dos blocos estruturais.

Para determinação das propriedades no estado fresco do graute, são comumente utilizados os ensaios de abatimento do tronco de cone (*slump* teste) (ABNT NBR NM 67, 1998) na obtenção da consistência, *slump* flow (ABNT NBR 15823-2, de 2017) para determinação do espalhamento, quando se tratar de mistura autoadensável, além do ensaio de funil V (ABNT NBR 15823-5,2017), que especifica os procedimentos para obtenção da viscosidade.

### 2.3.3 PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO

O graute no estado endurecido deve, de acordo com Roman (2017), possuir resistência à compressão suficiente para que quando combinada com as propriedades mecânicas dos blocos e argamassas atendam à resistência requerida de projeto, uma vez que esses materiais juntos definem a resistência à compressão final da alvenaria. E ainda, Roman (2017) completa que a retração sofrida pelo graute em estado endurecido deve ser mínima para que não ocorra a separação entre o graute e as paredes internas dos blocos.

Ademais, Ramalho e Corrêa (2003) acrescentam que a resistência à compressão característica do graute deve ser duas vezes a resistência do bloco. A resistência do bloco é referida à sua área bruta e seu índice de vazios é cerca de 50% devido aos vazados do bloco, o que justifica a execução de graute com resistência de 20 MPa em blocos de 10 MPa, por exemplo.

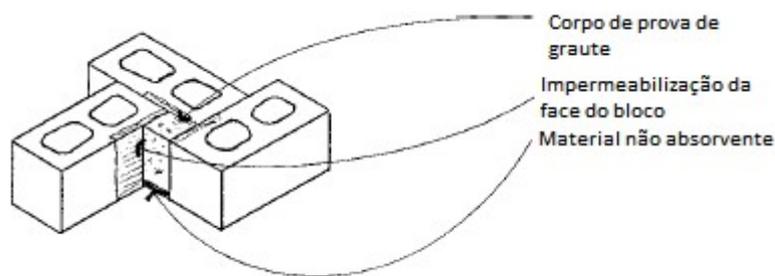
Por fim, a ABNT NBR 16868-1 (2020) diz que a resistência à compressão característica do graute deve ser maior ou igual a 15 MPa, sendo determinada conforme as normas ABNT NBR 5738 (2015) e ABNT NBR 5739 (2018). Uma das formas de avaliação da influência do graute na resistência à compressão da alvenaria é a realização do ensaio de compressão de prismas cheios, que é especificado pela ABNT NBR 16868-3 (2020).

As normas citadas anteriormente, ABNT NBR 5738 e ABNT NBR 5739, especificam a determinação da resistência à compressão do graute por meio de corpos de prova cilíndricos, apresentando altura igual ao dobro do diâmetro, que por sua vez pode ter 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm, 30 cm ou 45 cm, dependendo das dimensões dos agregados. Dessa forma, como no caso do graute são usados

agregados com tamanho máximo de 12,5 mm, os corpos de prova indicados são de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura.

Além disso, a norma ASTM C1019-11 estabelece outro método de obtenção da resistência à compressão do graute, que simula a situação do graute real e envolve a moldagem de corpos de prova prismáticos de seção quadrada (Figura 2), com dimensões iguais a 76 mm, podendo ser maiores, contanto que a altura seja o dobro dessa largura. E ainda, essa norma diz que os corpos de prova devem ser ensaiados à compressão conforme ASTM C39/C39M.

Figura 2- Moldagem de corpos de prova prismáticos para graute.



Fonte: Adaptado de ASTM – Standard Test Method for Sampling and Testing Grout

#### 2.3.4 O PAPEL DO GRAUTE NA ALVENARIA ESTRUTURAL

De acordo com Parkesian (2014), a utilização do graute em alvenarias estruturais se dá para preenchimento dos vazados verticais e horizontais da alvenaria, o que permite o aumento da resistência e também a aderência da armadura. Além disso, o graute também pode ser usado para preencher os espaços entre duas ou mais paredes ou outro elemento de alvenaria.

A ABNT NBR 16868-2 (2020) determina que o graute deve ser produzido assegurando as especificações de projeto a partir dos ensaios de controle de obra, também especificados nessa norma. Além disso, a mistura deve ser realizada em misturador mecânico e a utilização do material deve acontecer até 2h30 após a adição de água, com exceção de grautes que possuem aditivos retardadores de pega.

Como já foi dito anteriormente no tópico 2.4, Ramalho e Corrêa (2003) enfatizam a influência do graute na resistência das paredes de alvenaria estrutural, pois o uso de graute no preenchimento dos blocos vazados de concreto, por exemplo,

leva a um aumento da área bruta da unidade, promovendo a solidarização e aumento de resistência da estrutura como um todo.

Ramalho e Corrêa (2003, p.77) também trazem a seguinte exemplificação da influência do uso de graute na alvenaria estrutural:

“Por exemplo, tomando-se um bloco de concreto de resistência na área bruta igual a 6 MPa, com 50% de vazios, e realizando-se o preenchimento de seus furos com um graute de resistência igual à do material que compõe o bloco, ou seja 12 MPa, obtém-se na verdade um bloco com resistência à compressão na área bruta de 12 MPa.”

Já no caso de alvenaria estrutural feita com blocos cerâmicos, de acordo com Ramalho e Corrêa (2003), a avaliação de influência do graute é mais complexa, já que o material do bloco é diferente do material do graute, portanto, não há como prever com muita clareza o comportamento final do conjunto bloco-graute.

## 2.4 ADIÇÕES MINERAIS EM GRAUTES

O uso de adições minerais em grautes têm sido alvos frequentes de estudo, como é o caso de Khan *et al* (2020), que propuseram a substituição de cimento por resíduos de plástico normal, plástico irradiado e sílica ativa. Dessa forma, Khan *et al* (2020) desenvolveram os traços apresentados na Figura 3, variando as quantidades de cada adição.

Figura 3 - Traços propostos pelo estudo

Tipo de graute	Quantidade (g)			
	Cimento	PET (Normal/Irradiado)	Sílica Ativa	Água
Control	3800	0	0	1330
5PET	3610	190	0	1330
10PET	3420	380	0	1330
5SF	3610	0	190	1330
10SF	3420	0	380	1330
5PET and 5SF	3420	190	190	1330
10PET and 10SF	3040	380	380	1330
5PET and 10SF	3230	190	380	1330
10PET and 5SF	3230	380	190	1330

Fonte: Adaptado de Khan *et al* (2020)

Além disso, Khan *et al* (2020) avaliaram propriedades no estado fresco e endurecido dos traços propostos, como a fluidez, por meio do ensaio de *flow*, retração, resistências à compressão e flexão.

Dessa forma, foi observado por Khan *et al* (2020) que para a substituição de cimento, tanto por PET normal quanto por PET irradiado houve diminuição da

retração, já que a mistura de controle apresentou 4,23 mm desse parâmetro, e as misturas contendo 10% de PET normal e 10% de PET irradiado apresentaram, respectivamente, 3,84 mm e 3,50 mm. Apesar disso, foi verificado que para um maior teor de PET e sílica ativa, 10% de sílica ativa e 10% de PET normal, por exemplo, obteve-se um tempo maior de escoamento no ensaio de flow (26,26 s), o que é consideravelmente superior ao tempo de escoamento para a mistura controle (12,60 s), portanto, pôde-se concluir que a adição desses materiais diminui a fluidez.

E ainda, de acordo com Khan *et al* (2020), com a adição de PET normal houve uma redução de resistência à compressão se comparado aos resultados obtidos com o uso de PET irradiado. Um exemplo são os traços contendo 5% de PET normal e 5% de PET irradiado, que obtiveram, respectivamente, 42 MPa e 45 MPa para os resultados de resistência à compressão.

Yin *et al* (2021) também estudaram sobre adições em grautes ao utilizar resíduo de vidro em sua composição. Foram estudadas vinte misturas, com diferentes percentuais de resíduo de vidro (WGP), mostradas na Figura 4.

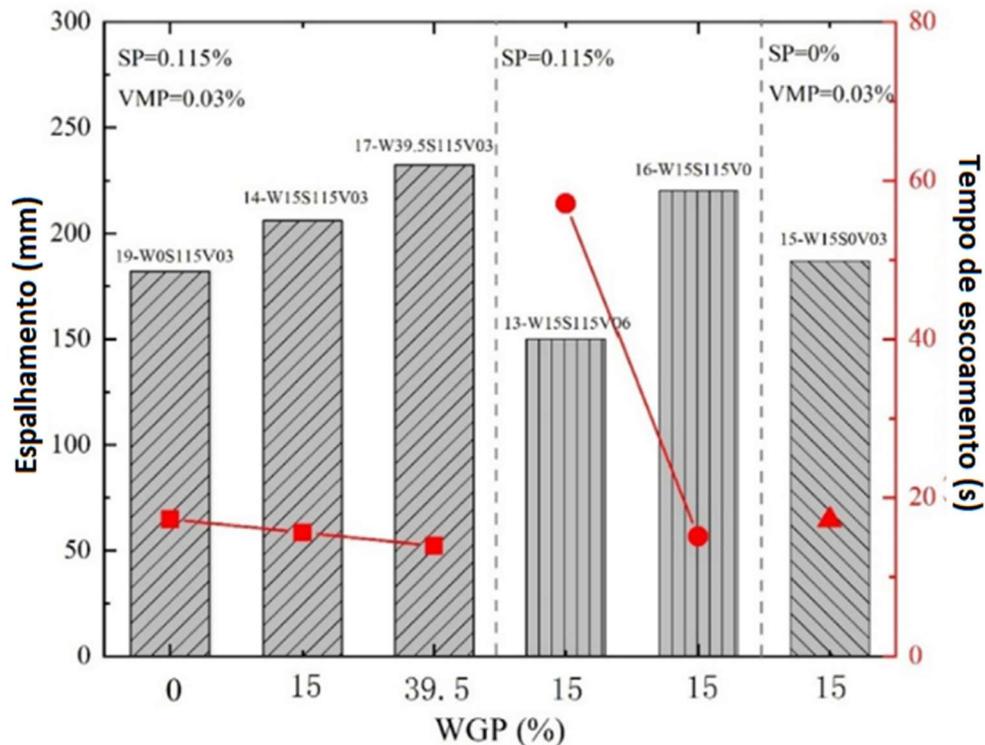
Figura 4 - Composições de graute utilizando resíduo de vidro

Mix no.	Sample	C (%)	WGP (%)	SP (%)	VMA (%)	W/B
1	W0S03V01	100	0	0.03	0.01	0.5
2	W0S2V05	100	0	0.2	0.05	0.5
3	W30S03V05	70	30	0.03	0.05	0.5
4	W15S115V03	85	15	0.115	0.03	0.5
5	W30S2V01	70	30	0.2	0.01	0.5
6	W15S115V03	85	15	0.115	0.03	0.5
7	W30S2V05	70	30	0.2	0.05	0.5
8	W15S115V03	85	15	0.115	0.03	0.5
9	W30S03V01	70	30	0.03	0.01	0.5
10	W0S03V05	100	0	0.03	0.05	0.5
11	W15S115V03	85	15	0.115	0.03	0.5
12	W0S2V01	100	0	0.2	0.01	0.5
13	W15S115V06	85	15	0.115	0.06	0.5
14	W15S115V03	85	15	0.115	0.03	0.5
15	W15S0V03	85	15	0	0.03	0.5
16	W15S115V0	85	15	0.115	0	0.5
17	W39.5S115V03	60.5	39.5	0.115	0.03	0.5
18	W15S115V03	85	15	0.115	0.03	0.5
19	W0S115V03	100	0	0.115	0.03	0.5
20	W15S254V03	85	15	0.254	0.03	0.5

Fonte: Yin *et al* (2021)

Foram realizados diversos ensaios com o objetivo de verificar a influência do resíduo no graute. Ao analisar a composição química e física do resíduo de vidro, o autor chegou à conclusão de que ele pode ser considerado um material pozolânico. Os ensaios de mini slump e o ensaio de cone mostraram que, ao aumentar o percentual de resíduo, os valores de mini slump aumentavam, enquanto os do ensaio de cone reduziam (Figura 5), mostrando melhora nesses valores.

Figura 5 - Resultados do ensaio de mini slump e ensaio de cone



Fonte: Adaptado de Yin *et al* (2021)

Além disso, resultados dos ensaios mostraram que as tensões de cisalhamento medidas foram diminuindo com o aumento do teor de resíduo de vidro. Enquanto o graute de referência, contendo 0% de resíduo, obteve valor de 17,73 MPa, os grautes com 15% e 39,5% obtiveram os valores de 6,67 e 8,61 MPa, respectivamente. Entretanto, mantendo o teor de 15%, o resultado aumentou de 5,7 MPa para 16,99 MPa.

Com relação à resistência à compressão, os resultados mostraram que, para o teor de 15% de resíduo, o valor foi 12% maior se comparado ao graute de referência (0%). Contudo, para 39,5% de resíduo, houve queda de 18%. Para a resistência à flexão, o teor de 15% obteve aumento, enquanto para teores maiores houve decréscimo.

Yin *et al* (2021) concluíram ainda que o teor de 15% de resíduo de vidro é o mais recomendado, com bons indicadores ambientais e bons resultados de ensaio.

Outro estudo sobre o uso de adições minerais foi realizado por Nepomuceno *et al* (2021), que analisaram o desempenho do graute com adição de pó de calcário, pó

de vidro, resíduo de cerâmica e metacaulim, que é um material pozolânico resultante da calcinação de argilas cauliníticas. O proporcionamento dos traços foi realizado conforme a Figura 6.

Figura 6 - Proporcionamento dos traços de graute

Mistura de graute	Proporções dos materiais secos					Água/Cimento	Aditivo (%)
	Cimento	Pó de calcário	Metacaulim	Pó de vidro	Resíduo de cerâmica		
C	1.00	—	—	—	—	0.360	1.6
CLM	1.00	1.00	—	—	—	0.300	2.0
CMK	1.00	—	1.00	—	—	0.500	2.0
CGL	1.00	—	—	1.00	—	0.385	2.0
CCP	1.00	—	—	—	1.00	0.395	2.0

Fonte: Adaptado de Nepomuceno *et al* (2021)

Dentre as várias características estudadas, Nepomuceno *et al* (2021) avaliaram as propriedades de fluidez, por meio do ensaio de mini slump, viscosidade pelo ensaio de cone Marshal e resistência à compressão.

De posse dos resultados, Nepomuceno *et al* (2021) puderam concluir que para uma igual porcentagem de substituição de cimento pela adição (50% em peso) e mesma quantidade de aditivo superplastificante (2%), foi necessária uma maior quantidade de água nas misturas contendo metacaulim, pó de vidro e resíduo de cerâmica, para que fosse obtido o mesmo resultado de tempo de escoamento no cone Marshal ( $18 \pm 2$  s) para todos os traços.

Nepomuceno *et al* (2021) também afirmam que a resistência à compressão do graute é reduzida em cerca de 30% quando são usados pó de calcário ou resíduo de cerâmica, e ainda, que a adição de pó de vidro e de metacaulim diminuem em aproximadamente 40% a resistência à compressão do graute. Contudo, Nepomuceno *et al* (2021) dizem que, de acordo com a literatura, os resultados são suficientes para atender aos requisitos de resistência dos grautes.

Por fim, Nepomuceno *et al* (2021) finalizam apontando a mistura contendo o resíduo de cerâmica como o traço que obteve, de forma geral, o melhor comportamento.

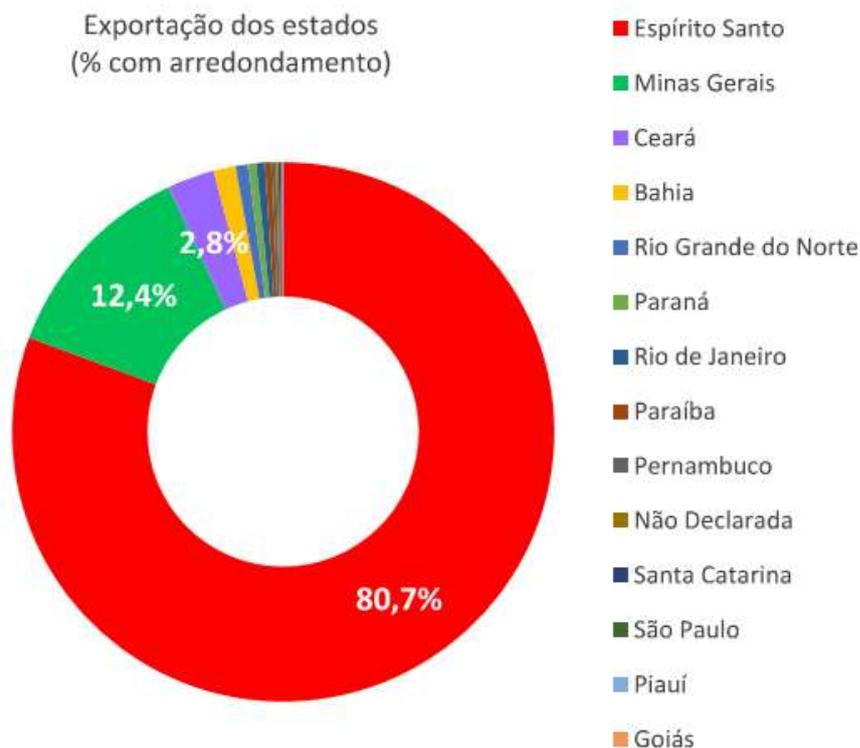
## 2.5 RESÍDUO DE BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS

### 2.5.1 INDÚSTRIA DE ROCHAS

Segundo o site do governo do Estado (2021), o Espírito Santo possui uma das maiores reservas de mármore e granito do Brasil, possuindo cerca de 3.500 empresas que atuam no ramo através da extração, produção e exportação de rochas ornamentais.

De acordo com o relatório de exportações de maio de 2021, apresentado pelo CENTRORochas, a exportação do estado correspondeu a 80,7% das exportações do país (Figura 7), correspondendo a um aumento se comparado ao mês anterior, que obteve um total de 79,77%, também de acordo com a mesma fonte.

Figura 7 - Exportações de Rochas Ornamentais em maio de 2021



Fonte: Relatório de Exportações - CENTRORochas

Ainda, conforme o Atlas de Rochas Ornamentais do Estado do Espírito Santo (2013), produzido pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), mais de 90% dos investimentos do Brasil nesse setor são destinados ao Espírito Santo.

Acrescenta que o estado possui grande potencial geológico, que é desenvolvido por meio de investimentos em pesquisas e tecnologias de extração e beneficiamento.

Porém, todo esse potencial vem acompanhado com uma problemática ambiental. De acordo com Campos *et al* (2014), 40% do volume do bloco se torna resíduo, sendo 26% resíduo muito fino e 14% resíduo grosso, estimando que o beneficiamento de rochas ornamentais resulta em torno de 1,5 Mt de resíduos finos e quase 1 Mt de resíduos grossos anualmente no país.

Segundo Teixeira *et al* (2018), os resíduos de rochas ornamentais são descartados, na maioria das vezes, em tanques de decantação ou aterro sem tratamento. Por conta da grande quantidade gerada de resíduo, ele acaba por se tornar uma fonte de contaminação e poluição do meio ambiente.

Com isso, Campos *et al* (2014) acrescentam:

“Minimizar impactos ambientais, como a minimização da produção de resíduos, e maximizar o uso dos recursos naturais não renováveis são diretrizes das sociedades modernas, já engajadas na busca do desenvolvimento sustentável. Por isso, em todos os países e, particularmente, no Brasil tanto a legislação ambiental, quanto a Política Nacional de Resíduos Sólidos, requerem que sejam buscadas soluções técnicas para o aproveitamento desses resíduos”.

Foster (2016) introduz o conceito de economia circular como alternativa para a solução de problemas ambientais relacionados a resíduos sólidos. Segundo ele, a economia circular acaba por reinserir os materiais no ciclo produtivo como forma de diminuir os impactos negativos. Guarin *et al* (2016) acrescentam ainda que muitos estudos estão evoluindo na área da economia circular, fazendo com que os resíduos sejam vistos como recursos, que podem ser utilizados para a produção de novos produtos ou também utilizados para melhorar as suas propriedades.

De acordo com Lopes (2020), a construção civil, apesar de ser grande geradora de resíduos, apresenta um vasto número de possibilidades de reaplicação desses resíduos em suas próprias atividades, como forma de promover a economia circular e valorizando os resíduos. A autora cita exemplos de aplicação de resíduos, como produção de cimentos, concretos, argamassas etc.

Visto o impacto ambiental que o resíduo gerado possui, Teixeira (2018) diz que alguns estudos apontam o reaproveitamento do resíduo como um material alternativo

em: argamassas, revestimento cerâmico, piso intertravado, fabricação de concreto, entre outros.

### 2.5.2 CARACTERÍSTICAS DOS RBRO

De acordo com Ghirard *et al* (2019), a composição química dos resíduos de rocha ornamental é influenciada pelas rochas de origem. A ABIROCHAS (2018) define três grupos de rocha ornamental de acordo com a sua composição: rochas silicáticas, que contém minerais silicáticos em sua composição; rochas carbonáticas, com porcentagens de calcita, dolomita e outros carbonatos; e as rochas silicosas, formadas por sílica amorfa e/ou quartzo. Complementa ainda que as rochas carbonáticas e silicosas geralmente são sedimentares ou metamórficas de origem sedimentar, enquanto as silicáticas são de origem ígnea.

Ainda de acordo com Ghirard *et al* (2019), a análise mostrou presença de óxido de cal nos resíduos de rocha ornamental, com o teor a depender de fatores como o método de serragem dos blocos.

Os resíduos de rochas ornamentais são muito variados, conforme Figura 8. Santos *et al* (2013) em seu estudo concluiu que os resíduos de corte e beneficiamento de rocha ornamental possuem variação de características químicas, físicas e térmicas, a depender do processo em que foi coletado. Ao analisar quatro tipos de resíduos, coletados em diferentes processos, chegou as seguintes conclusões: o principal elemento constituinte era a sílica, significando que a rocha de origem era silicatada; havia a presença de óxido de cálcio nos resíduos, proveniente do processo de corte com granalha metálica; os comportamentos granulométricos dos resíduos variavam, de acordo com a origem do processo; a análise morfológica resultou em resíduos irregulares, isso por conta dos processos de corte e beneficiamento das rochas.

Figura 8 - Resíduo de Rochas Ornamentais

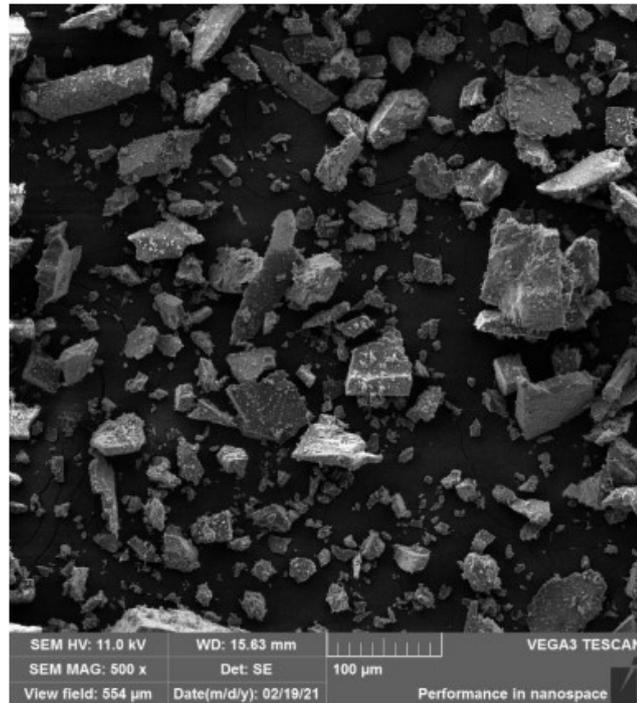


Fonte: Jornal da UNICAMP (2017)

A partir da análise de resíduos provenientes de três empresas diferentes, Lopes (2007) identificou a composição mineralógica pelo ensaio de difração de raios x. Os resultados mostraram minerais como quartzo, microlínio, anortita e muscovita, típico de rochas graníticas, além da calcita e dolomita, típica dos mármore. Segundo ele, os resultados mostram que o RBRO possui forma cristalina, por conta da presença de minerais como quartzo e muscovita.

Arpini (2021) analisou a morfologia de resíduos de beneficiamento de rocha ornamental, provenientes de rocha calcária, por meio de imagem de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), conforme Figura 9, chegando à conclusão de que o RBRO possui partículas irregulares e de formato angular. De acordo com o autor, isso pode ser explicado pelos processos de corte e polimento que as rochas são submetidas.

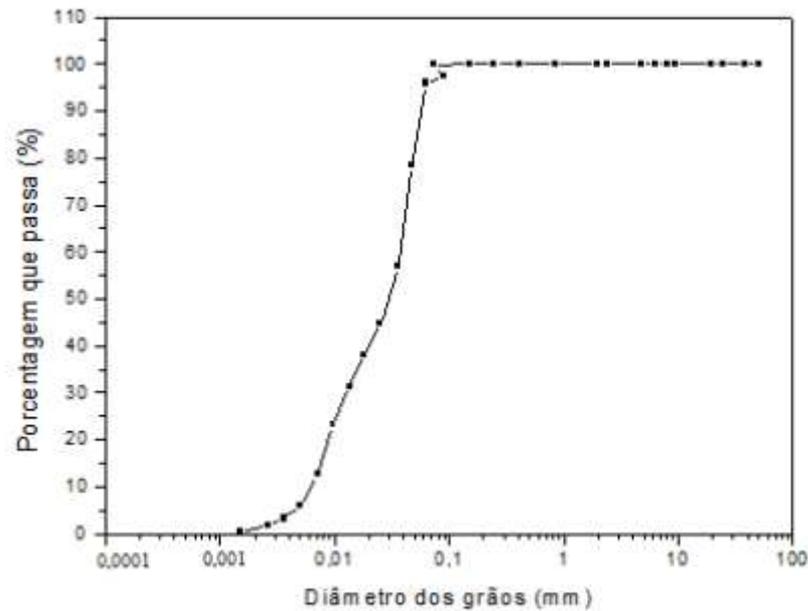
Figura 9 - Análise MEV de RBRO



Fonte: Arpini (2021)

Em seu estudo, Apolinário (2014) verificou a granulometria do resíduo, encontrando em seus resultados o valor de 0,012 mm (12 µm), tendo como consequência um melhor empacotamento das partículas, o complemento da granulometria e o tamponamento dos poros devido à atuação como fíler. Em complemento, Ribeiro (2013) encontrou em pesquisa granulometria correspondente a 7,8% de fração areia ( $60 \mu\text{m} \leq x < 600 \mu\text{m}$ ), 91,1% de fração silte ( $2 \mu\text{m} \leq x < 60 \mu\text{m}$ ) e 1,1% de fração argila ( $< 2 \mu\text{m}$ ), resultando em 92,2% de partículas menores que 0,075 mm, conforme Figura 10, o que indica ser material pulverulento, que pode atuar como fíler ao preencher os vazios.

Figura 10 - Distribuição granulométrica do resíduo de rocha ornamental



Fonte: Ribeiro (2013)

Em sua pesquisa, Lopes (2007) avaliou a atividade pozolânica do resíduo com a cal e com o cimento. Para o cimento, os resultados mostraram um índice de atividade pozolânica inferior a 75%, não possuindo assim atividade pozolânica. Para a cal se chegou na mesma conclusão. O autor ainda conclui que o resíduo de rochas ornamentais pode ser classificado na classe II B – Inerte, podendo então ser utilizado como material de reciclagem sem oferecer risco ambiental e à saúde humana.

### 2.5.3 USO DE RBRO EM MATRIZES CIMENTÍCIAS

De acordo com Bastos *et al* (2013), pesquisas desenvolvidas com a utilização do RBRO em matrizes cimentícias indicam aplicações em produção de concreto, argamassas, blocos, peças pré-moldadas e/ ou como constituinte do cimento. Acrescenta ainda que o resíduo pode atuar como adição mineral, substituto de agregados ou até o aglomerante.

Conforme Galetakis e Soultana (2016), a adição de partículas mais finas que o cimento em matrizes cimentícias pode melhorar a zona de transição na interface entre a pasta e o agregado, pois há uma redução de vazios na pasta, melhorando então o empacotamento e a estabilidade.

Teixeira *et al* (2018) estudaram um total de 12 pastas cimentícias, com diferentes teores de RBRO, chegando à conclusão de que esse resíduo funciona com

efeito de filler em matrizes cimentícias e que pode ser utilizado, obtendo assim um benefício ambiental.

Arpini (2021) analisou a adição de RBRO em argamassas autoadensáveis com três teores, 10%, 15% e 20%. No estado fresco os resultados mostraram menor teor de ar incorporado, maior peso específico, além de um menor tempo de escoamento no mini-funil V, indicando bombeamento mais fácil em concretos autoadensáveis. Para o estado endurecido obteve-se aumento na resistência à compressão das idades iniciais e não houve prejuízo às resistências futuras das misturas dosadas com 15% e 20% de RBRO, em comparação com a mistura referência (0% de RBRO).

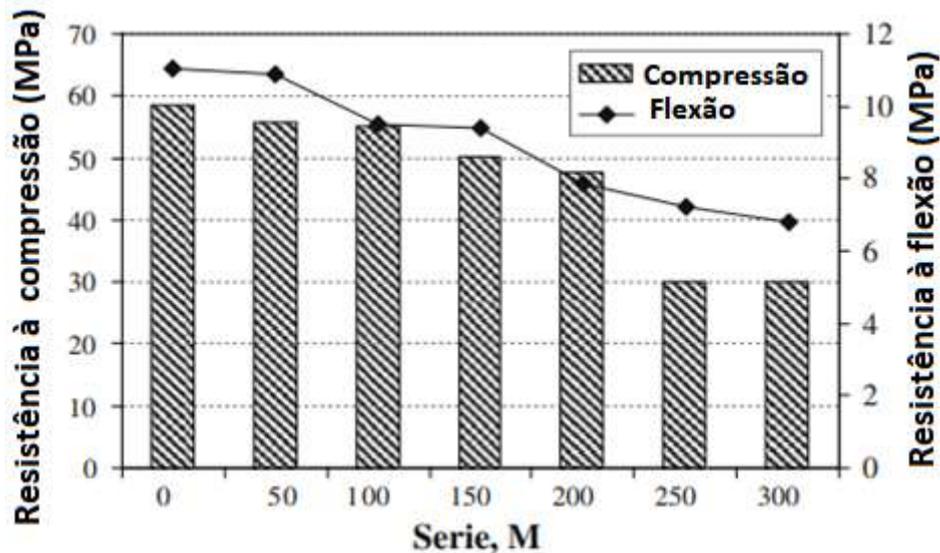
Vazzoler *et al* (2018) estudaram a aplicação do resíduo de rocha ornamental como material pozolânico em matrizes cimentícias. Ao avaliar a microestrutura das pastas cimentícias com 0%, 5% e 10% de adição de resíduo em diferentes idades, a conclusão foi a de que, além de contribuir para o impacto ambiental, a utilização do resíduo traz melhora para as propriedades da pasta. A medição da taxa de atividade pozolânica com a cal indicou consumo de hidróxido de cálcio na presença de umidade, o que resultou em compostos responsáveis por aumentar a resistência à compressão. Além disso, a mistura produziu uma matriz mais densa, o que pode conferir maior resistência à agentes externos. Por fim, o resíduo atingiu valores satisfatórios com relação a pozolanidade, o que faz com que a sua utilização seja sugerida.

Para analisar a influência do resíduo de mármore e granito em concretos, Bacarji *et al* (2013) utilizaram resíduos provenientes de três empresas diferentes da cidade de Goiânia. Além da mistura de controle com 0%, o resíduo foi adicionado como substituto do cimento em porcentagens de 5%, 10% e 20%. Os resultados mostraram que a adição do resíduo resultou em queda da resistência à compressão. Porém, para a mistura de 5% o impacto foi insignificante, indicando uma alternativa sustentável para a substituição do cimento.

Topçu *et al* (2008) pesquisaram a influência da adição de resíduo de pó de mármore como filler nas propriedades do estado fresco e endurecido de concretos autoadensáveis. Foram avaliadas sete misturas com quantidades de resíduo diferentes, sendo 0, 50, 100, 150, 200, 250 e 300 kg/m<sup>3</sup> de resíduo. Os resultados mostraram que, com relação as propriedades do estado fresco, os valores de slump, ar incorporado e teste do funil-V foram melhores para as misturas abaixo de 200 kg/m<sup>3</sup>.

Para as propriedades do estado endurecido, novamente as misturas abaixo de 200 kg/m<sup>3</sup> apresentaram melhores resultados, com valores satisfatórios de resistência à compressão nas idades iniciais e finais, conforme Figura 11.

Figura 11 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão e resistência à flexão



Fonte: Adaptado de Topçu *et al* (2008)

Mello (2018) avaliou o ciclo de vida da utilização do RBRO em matrizes cimentícias para analisar a viabilidade ambiental da implementação desse resíduo. Foram analisados 127 traços em 10 categorias diferentes de materiais, sobre secagem, transporte, queima e utilização do resíduo. O estudo mostrou que a utilização do RBRO é viável ambientalmente, apresentando redução de impactos na produção de argamassas, concreto, concreto autoadensável e como substituição de cimento em blocos de vedação e de pavimentação.

Por fim, Arel (2015) realizou uma revisão sobre a substituição do cimento por resíduos de mármore e uso de resíduos de mármore como agregado na produção de concreto. A conclusão foi a de que, ao substituir 10% de agregados pelo resíduo, o custo de produção do concreto cairia de US \$ 40/m<sup>3</sup> para US \$ 34/m<sup>3</sup>. Ainda, a substituição do cimento pelo resíduo, com 5% e 10%, pode promover a melhora de propriedades mecânicas do concreto e reduzir emissões de CO<sub>2</sub> provenientes da produção de cimento em 12%.

#### 2.5.4 USO DE RBRO EM GRAUTE

O uso de RBRO na produção de graute ainda é um tema pouco explorado, contudo, Martins *et al* (2020) ressaltam que o volume de vazios é um fator de impacto na resistência do graute já que está relacionado com a porosidade, e por isso, o uso de RBRO pode auxiliar no preenchimento nesses espaços vazios, por se tratar de um material fino, e colaborar com o aumento da resistência à compressão no estado endurecido.

Além disso, por ser um material destinado ao preenchimento de vazios confinados, e ainda, por se tratar de um material extremamente fino, Martins *et al* (2020) afirmam que o uso de RBRO colabora para que o graute consiga cumprir o seu papel de solidarização da estrutura auxiliando no alcance de todos os espaços vazios dos blocos.

O estudo de Martins *et al* (2020) realizaram a dosagem de 3 (três) traços de graute, nos quais:

- 1 (um) traço de controle com 0% (zero por cento) de RBRO;
- 1 (um) traço com substituição de 50% do agregado miúdo pelo RBRO;
- 1 (um) traço com substituição de 50% do cimento pelo resíduo.

As conclusões do estudo, de acordo com Martins *et al* (2020), foram que na substituição do agregado miúdo, apesar de ter havido uma perda de apenas 10% de resistência à compressão aos 28 dias com relação ao traço de controle (sem adição de RBRO), houve também uma perda de fluidez, alcançando 193 mm de abatimento, cerca de 84% do abatimento de tronco de cone obtido para o traço referência, o que está fora do intervalo entre 200 mm e 230 mm para grautes proposto por Prudêncio Júnior *et al* (2002). Já no caso da substituição do cimento, os resultados de fluidez foram satisfatórios, 228 mm, aproximadamente 99% do abatimento obtido para o traço referência, contudo, houve uma perda de 50% de resistência em relação ao traço de controle. Apesar do exposto, dependendo dos requisitos de resistência e fluidez da aplicação final do graute, concluiu-se que é possível sua utilização.

Ademais, com o objetivo de determinar a influência da adição de resíduo de beneficiamento de mármore às propriedades no estado fresco do graute, Çınar *et al*

(2019) propuseram a dosagem desse material variando a relação água/cimento (0,75, 1, 1,25 e 1,5), e também o teor de substituição em volume do cimento pelo resíduo em questão para cada uma dessas relações (0%, 5%, 10%, 15%, 20% e 25%).

Ao observar a Figura 16 é possível verificar um resumo de todos os traços determinados por Çinar *et al* (2019), bem como os resultados de alguns dos ensaios feitos para a verificação das propriedades no estado fresco.

O ensaio de Mini Slump realizado por Çinar *et al* (2019) teve como objetivo a análise da fluidez do graute. Esse ensaio, de acordo com Monte (2003) é similar, com exceção das dimensões do cone, ao abatimento de tronco de cone convencional cujo procedimento é dado pela ABNT NBR 16889 (2020), tendo como principais vantagens a menor quantidade de material utilizado e a possibilidade de analisar a ocorrência de exsudação.

O outro ensaio destacado foi o de Funil de Marsh que, de acordo com Monte (2003), tem o objetivo de determinar a viscosidade do graute por meio do tempo de escoamento do material através do funil, ou seja, quanto maior for o tempo de escoamento, maior é a viscosidade.

Dessa forma, Çinar *et al* (2019) concluíram que as porcentagens de resíduo de beneficiamento de mármore usadas nos traços proporcionaram um leve aumento de viscosidade para cada relação água/cimento. E ainda, que o aumento da relação água/cimento ocasionou, de forma geral, a diminuição da viscosidade.

Por fim, de acordo com Çinar *et al* (2019), analisando cada relação água/cimento separadamente, o aumento da porcentagem de resíduo de mármore na mistura provoca a diminuição do mini slump. Além disso, ao analisar uma mesma porcentagem de resíduo para as quatro relações água/cimento é possível verificar que há aumento do mini slump, ou seja, melhora da trabalhabilidade.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção, serão abordados os materiais e os métodos de análise empregados neste estudo, objetivando o avanço do conhecimento no tema proposto, assim como a promoção da reprodutibilidade desta pesquisa. Na seção “materiais”, é apresentada a caracterização dos materiais empregados neste trabalho; já a seção “métodos” apresenta os ensaios realizados.

#### 3.1 MATERIAIS

##### 3.1.1 CIMENTO

Para a produção dos grautes o cimento utilizado foi o CP V – ARI Plus da empresa LafargeHolcim, fabricado em Pedro Leopoldo/MG. A massa específica do cimento é igual a 3,1 g/cm<sup>3</sup> e a Tabela 1 abaixo apresenta as propriedades, de acordo com o fabricante.

Tabela 1 - Propriedades do cimento usado

<b>ENSAIOS QUÍMICOS</b>				
ENSAIOS	NBR N°	UNIDADE	MÉDIA	ESPECIFICAÇÃO NBR 16697/18
PF 950C	NM 18/12	%	5,86	≤6,50
SO3	NBR 14656/01	%	2,74	≤4,50
RI	NM 15/12	%	0,81	≤3,50
MgO	NBR 14656/01	%	0,78	≤6,50
<b>ENSAIOS FÍSICOS</b>				
ENSAIOS	NBR N°	UNIDADE	MÉDIA	ESPECIFICAÇÃO NBR 16697/18
Blaine	NBR 16372/15	cm <sup>2</sup> /g	4826	Não aplicável
Ret. 38mic	NBR 12826/14	%	2,4	Não aplicável
IP	NBR 16607/18	Min	125	≥60
FP	NBR 16607/18	Min	173	Não aplicável

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO				
ENSAIOS	NBR N°	UNIDADE	MÉDIA	ESPECIFICAÇÃO NBR 16697/18
RC 1 DIA (NBR)	NBR 7215/19	Mpa	0,73	≥14,0
RC 3 DIAS (NBR)	NBR 7215/20	Mpa	1,05	≥24,0
RC 7 DIAS (NBR)	NBR 7215/21	Mpa	1,06	≥34,0
RC 28 DIAS (NBR)	NBR 7215/22	Mpa	0,71	Não aplicável

Fonte: Autoras

### 3.1.2 ADITIVO

Foram utilizados dois tipos de aditivos para a produção dos grautes, um superplastificante e um redutor de retração.

O aditivo superplastificante utilizado, presente em todos os seis traços produzidos, foi o ADVA CAST 525 (Figura 12). De acordo com o fabricante, a massa específica está entre 1,04 e 1,06 g/cm<sup>3</sup> e seu aspecto é líquido alaranjado. A dosagem recomendada é de 0,4 a 1,2%.

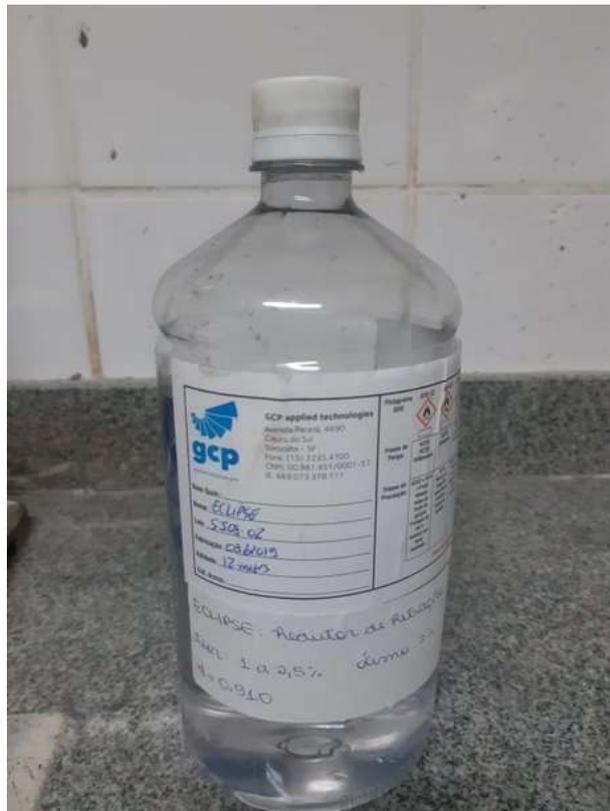
Figura 12 - Aditivo superplastificante.



Fonte: Autoras

O aditivo redutor de retração, que foi utilizado em apenas três traços moldados, é o ECLIPSE (Figura 13). Segundo informações do fabricante, sua massa específica é igual a  $0,91 \text{ g/cm}^3$  e seu aspecto é líquido transparente, com dosagem recomendada de 1,0 a 2,5%.

Figura 13 - Aditivo redutor de retração.



Fonte: Autoras

### 3.1.3 AGREGADO MIÚDO

O agregado miúdo utilizado na confecção do graute estudado foi uma areia quartzosa oriunda de cavas existentes na região de Linhares (Figura 14).

Figura 14 - Areia quartzosa utilizada no graute



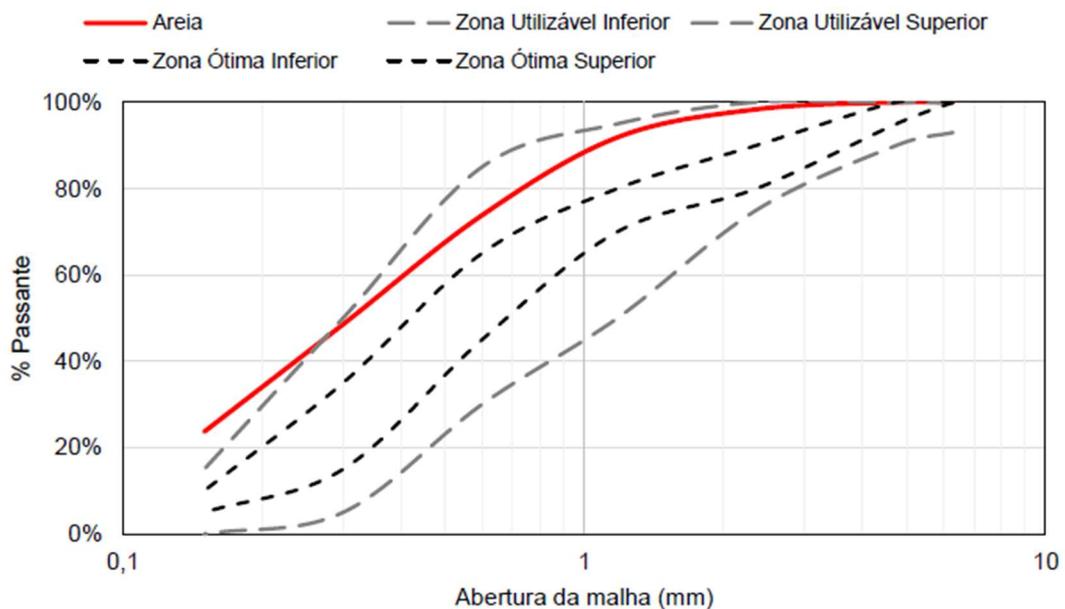
Fonte: Oliveira *et al* (2019)

As informações da caracterização do agregado miúdo, realizada por Oliveira *et al* (2019), são as seguintes:

- Dimensão mínima característica:  $d_{\min} = 0,15 \text{ mm}$ ;
- Dimensão máxima característica:  $d_{\max} = 2,36 \text{ mm}$ ;
- Módulo de finura:  $MF = 1,64 \text{ mm}$ ;
- Massa específica:  $\rho = 2,65 \text{ g/cm}^3$ .

Oliveira *et al* (2019) também traçaram a curva granulométrica do agregado (Figura 15), delimitando as zonas estabelecidas pela ABNT NBR 7211 (2019).

Figura 15 - Curva granulométrica da areia



Fonte: Oliveira *et al* (2019)

### 3.1.4 RESÍDUO DE BENEFICIAMENTO DE ROCHA ORNAMENTAL (RBRO)

Foi utilizado um resíduo proveniente do beneficiamento de granito realizado por empresas extratoras de rochas ornamentais em Cachoeiro de Itapemirim, no Espírito Santo.

A preparação desse material para uso consistiu no destorroamento e peneiramento do resíduo bruto, de forma que ele ficasse uniforme e sem pedaços maiores de rocha (Figura 16). Para caracterização desse resíduo, foram realizados os ensaios de Massa Específica e Finura Blaine.

Figura 16 - Amostra de resíduo de beneficiamento de granito preparada para uso.



Fonte: Autoras

O ensaio de massa específica foi realizado de acordo com a AMN NM 23 (2000). Essa norma traz o uso do frasco volumétrico de Le Chatelier (Figura 17) como ferramenta principal na determinação da massa específica de materiais finos.

Figura 17 - Frasco de Le Chatelier usado no ensaio.



Fonte: Autoras

Primeiro foram pesadas duas amostras de resíduo com aproximadamente 60 gramas cada uma, pois já é sabido que essa quantidade é suficiente para realizar o ensaio. Além disso, foi usado um cadinho de massa conhecida (121,88 g) como recipiente para essas pesagens. Esses dados iniciais encontram-se na Tabela 2.

Tabela 2 - Dados da pesagem inicial

<b>MASSA TOTAL (RESÍDUO + CADINHO)</b>	
AMOSTRA 1	AMOSTRA 2
182,15 g	181,92 g

Fonte: Autoras

Com as amostras de resíduos já preparadas, e também com o frasco de Le Chatelier limpo e seco, iniciou-se o ensaio. Primeiro, com ajuda de um pequeno funil, colocou-se água no recipiente até que chegasse a uma marca entre 0 e 1 cm<sup>3</sup> (Figura 18). Após isso, o frasco foi colocado em banho-maria na temperatura ambiente por 30 minutos, e então foi realizada a leitura de volume. Nas duas vezes que o procedimento foi feito, a marca atingida inicialmente foi de 0,3 cm<sup>3</sup>.

Figura 18 - Água sendo colocada no Frasco de Le Chatelier



Fonte: Autoras

O próximo passo foi inserir cuidadosamente, com auxílio de um funil, o resíduo dentro do frasco, conforme de forma que o material se misture com a água e não forme aglomerados que podem acabar entupindo o recipiente. Isso foi feito até que o volume total atingisse uma marca entre 18 e 24 cm<sup>3</sup> (Figura 19).

Figura 19 - Volume final de água + resíduo



Fonte: Autoras

Posteriormente, o frasco foi colocado em banho-maria na temperatura ambiente por mais 30 minutos antes de fazer a leitura final de volume. E ainda, a massa que restou no cadinho foi pesada para realização dos cálculos finais de massa específica. A Tabela 3 mostra um resumo dos dados obtidos durante o ensaio.

Tabela 3 - Dados para cálculo da massa específica

<b>RESUMO DE DADOS PARA CÁLCULO DA MASSA ESPECÍFICA</b>		
	AMOSTRA 1	AMOSTRA 2
Massa (Resíduo + Cadinho) – <b>Inicial</b>	182,15 g	181,92 g
Massa (Resíduo + Cadinho) – <b>Final</b>	133,48 g	133,67 g
Volume Inicial	0,3 cm <sup>3</sup>	0,3 cm <sup>3</sup>
Volume Final	19,2 cm <sup>3</sup>	19,1 cm <sup>3</sup>

Fonte: Autoras

Por fim, tornou-se possível o cálculo da massa específica, que por sua vez é dada pela equação (4) abaixo.

$$\rho = \frac{m_1 - m_2}{V_2 - V_1} \times \alpha \quad (4)$$

Sendo:

$m_1$ : Massa (Resíduo + Cadinho) – Inicial, em gramas;

$m_2$ : Massa (Resíduo + Cadinho) – Final, após colocar parte do material dentro do frasco, em gramas;

$V_1$ : Volume Inicial, em cm<sup>3</sup>;

$V_2$ : Volume Final, em cm<sup>3</sup>;

$\alpha$ : coeficiente de calibração do frasco, igual a 0,9911.

Por meio do cálculo explicitado acima, foi obtido o valor de massa específica igual a 2,548 g/cm<sup>3</sup>, que por sua vez é a média entre os valores calculados para as amostras 1 e 2.

É importante ressaltar que pelo fato de a caracterização do resíduo ter sido feita após a produção e ensaios dos traços, para o cálculo da quantidade de resíduo a massa específica utilizada teve como referência o trabalho de Arpini (2021), igual a  $2,74 \text{ g/cm}^3$ . Com isso, a quantidade de areia substituída deveria ser menor. Realizando a correção para a massa específica obtida no ensaio, essa quantidade adicionada a mais é de  $5,50 \text{ g}$  ( $0,23\%$ ) de areia para o traço com  $5\%$  de resíduo e  $10,97 \text{ g}$  ( $0,47\%$ ) de areia para o traço com  $10\%$  de resíduo.

O outro ensaio de caracterização realizado foi o de finura pelo método de Blaine, que é normatizado pela ABNT NBR 16372 (2015), e também é chamado de método de permeabilidade ao ar.

Primeiro, é importante que já se conheça a massa específica do material, por isso esse ensaio foi realizado depois da determinação dessa propriedade. Inicialmente calcula-se a massa de resíduo para realização do ensaio através da equação (5) abaixo.

$$m_1 = (1 - \varepsilon) \times \rho \times v \quad (5)$$

Sendo:

$m_1$ : massa específica do material, em gramas;

$\varepsilon$ : porosidade da camada, inicia-se com o chute de  $0,5$ ;

$\rho$ : massa específica do material em  $\text{g/cm}^3$ ;

$v$ : volume da camada já estabelecido, igual a  $1,808 \text{ cm}^3$ .

A massa calculada ( $m_1$ ) foi colocada em um recipiente cilíndrico devidamente preparado conforme a ABNT NBR 16372 (2015) com ajuda de um funil (Figura 20). Após isso, foi inserido lentamente um êmbolo por meio da sua abertura superior, para que fosse realizada compactação do resíduo dentro do compartimento cilíndrico. É muito importante que haja uma certa dificuldade no momento da compactação, mas também não pode ser tanta que impeça o recipiente de fechar completamente. Dessa forma, dependendo da dificuldade de compactação é necessário calcular outra massa, alterando o  $\varepsilon$ .

Figura 20 – Equipamentos para realização do ensaio de finura Blaine.



Fonte: Autoras

Já com a amostra devidamente compactada dentro do recipiente cilíndrico, coloca-se esse conjunto no aparato mostrado na Figura 21, e desloca-se o líquido até uma determinada marca azul do equipamento. Após isso, libera-se a passagem de ar através da amostra, cronometrando o tempo que o líquido leva para alcançar a linha azul inferior, ou seja, foi marcado o tempo que o ar levou para empurrar um volume conhecido de líquido.

Figura 21 - Aparato utilizado no ensaio de finura Blaine



Fonte: Autoras

Por fim, de posse dos dados obtidos com o ensaio, calcula-se a finura do resíduo por meio da equação (6) abaixo.

$$S = \frac{K \times \sqrt{\varepsilon^3} \times \sqrt{t}}{\rho \times (1 - \varepsilon) \times \sqrt{0,1\eta}} \quad (6)$$

Sendo:

$S$ : finura Blaine, em  $\text{cm}^2/\text{g}$ ;

$\varepsilon$ : porosidade da camada;

$t$ : tempo, em segundos;

$\rho$ : massa específica do material, em  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;

$\eta$ : viscosidade do ar em função da temperatura.

Os dados obtidos com esse ensaio seguem na Tabela 4 abaixo.

Tabela 4 - Dados obtidos com o ensaio de finura Blaine

<b>RESUMO DE DADOS PARA CÁLCULO DA FINURA BLAINE</b>		
	AMOSTRA 1	AMOSTRA 2
Massa	1,83 g	1,89 g
Porosidade ( $\varepsilon$ )	0,6028	0,5897
Tempo ( $t$ )	75 s	91 s
Temperatura ambiente	26,0 °C	26,0 °C

Fonte: Autoras

Dessa forma, por meio dos dados e dos cálculos explicitados acima foi possível obter o valor de 7.461,23 g/cm<sup>3</sup> para a finura Blaine do resíduo, que por sua vez é a média entre os valores obtidos para as amostras 1 e 2. Além disso, de acordo com Arpini (2021) a literatura apresenta um intervalo comum de Finura Blaine para esse tipo de material, que é entre 3.000 g/cm<sup>3</sup> e 9.000 g/cm<sup>3</sup>, portanto, é possível inferir que o resultado obtido está dentro do intervalo esperado.

## 3.2 MÉTODOS

### 3.2.1 TRAÇOS UTILIZADOS

O traço utilizado nas misturas do graute teve como referência o trabalho de Arpini (2021), que analisou argamassas autoadensáveis com adição de resíduo de beneficiamento de rocha ornamental. Assim, o traço utilizado foi 1:1,63:0,387 (cimento:areia:água).

Ao todo foram dosados seis traços (Figura 22 e Figura 23), divididos entre referência (com e sem aditivo redutor de retração), 5% de resíduo (com e sem aditivo redutor de retração) e 10% de resíduo (com e sem aditivo redutor de retração). A quantidade de resíduo utilizada foi calculada sobre a massa de cimento e a substituição foi feita na areia, em volume.

Figura 22 - Misturas sem aditivo redutor de retração.



Fonte: Autoras

Figura 23 - Misturas com aditivo redutor de retração.



Fonte: Autoras

Além disso, para todos os traços, as quantidades de cimento, água e aditivo foram mantidas constantes, variando apenas a quantidade de resíduo e areia. A quantidade de aditivo superplastificante utilizada foi de 0,3%, enquanto a de aditivo redutor de retração foi de 1,0%, ambos da massa de cimento.

### 3.2.2 CONFECÇÃO DOS GRAUTES

Como já mencionado anteriormente, foram produzidos, no total, seis grautes. Para o cálculo da quantidade de graute a ser produzido para cada traço, foram considerados os volumes dos corpos de prova que seriam moldados, a quantidade

necessária para a realização dos ensaios e a capacidade da argamassadeira disponível, resultando em 2 litros de cada graute.

Primeiramente, todo o material necessário para realizar a produção foi pesado e separado de acordo com cada mistura (Figura 24). A Tabela 5 apresenta as quantidades de material para a produção de 1 m<sup>3</sup> das misturas, em quilos.

Figura 24 - Materiais separados para produção dos grautes



Fonte: Autoras

Tabela 5 - Quantidade de material para a produção de 1 m<sup>3</sup> da mistura, em quilos

TRAÇO	TEOR	CIMENTO	RBRO	AREIA	ÁGUA	ADITIVO SUPERP.	ADITIVO RED. RETR
REF	0%	754,9	0	1230,49	292,15	2,27	0
5% RBRO	5%	754,9	37,75	1193,99	292,15	2,27	0
10% RBRO	10%	754,9	75,49	1157,47	292,15	2,27	0
REF + RR	0%	754,9	0	1230,49	292,15	2,27	0,76

TRAÇO	TEOR	CIMENTO	RBRO	AREIA	ÁGUA	ADITIVO SUPERP.	ADITIVO RED. RETR
5% RBRO + RR	5%	754,9	37,75	1193,99	292,15	2,27	0,76
10% RBRO + RR	10%	754,9	75,49	1157,47	292,15	2,27	0,76

Fonte: Autoras

Toda a produção dos grautes foi feita no Laboratório de Ensaio em Materiais de Construção (LEMAC), na UFES, assim como a execução dos ensaios e moldagem dos corpos de prova. Foi utilizada uma argamassadeira (Figura 25) como misturador mecânico, de duas velocidades (baixa e alta).

Figura 25 - Argamassadeira utilizada para a produção dos grautes.



Fonte: Autoras

A mistura foi feita seguindo um padrão de mistura, com os passos detalhados abaixo:

- i. Inicialmente, antes mesmo de travar o recipiente na argamassadeira, foram misturados o RBRO, o cimento e 60% da água;
- ii. Ligou-se o equipamento por 30 segundos em velocidade baixa;
- iii. Com o equipamento desligado, foi feita uma raspagem manual de alguns resquícios de material que não conseguiram ser misturados de primeira e ficaram nas paredes do recipiente;
- iv. Ligou-se o equipamento novamente em velocidade baixa e adicionou-se o aditivo, o agregado miúdo e o restante de água (40%) aos poucos, inclusive aproveitando parte da água para retirar toda a quantidade de aditivo do béquer, não ultrapassando o tempo total de 1 minuto e 20 segundos de mistura;
- v. Novamente com o equipamento desligado é feita uma raspagem manual dos resquícios de material que acabam ficando das laterais do recipiente;
- vi. Ligou-se a argamassadeira em velocidade alta por mais 1 minuto e 30 segundos.

Após a mistura, os ensaios para a determinação das propriedades no estado fresco foram realizados, assim como a moldagem dos corpos de prova.

### 3.2.3 PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO

- Índice de Consistência (*Flow Table*)

Para a determinação do índice de consistência do graute foi realizado o ensaio *flow table*, normatizado pela ABNT NBR 13276 (2016), adaptado para mistura autoadensável, ou seja, sem a necessidade dos golpes de compactação.

Anteriormente ao ensaio, o tronco de cone e a mesa foram limpos e levemente umedecidos. Após o preparo do graute, o tronco de cone foi preenchido inteiramente (Figura 26). Devido ao fato de o graute ser autoadensável, não foram feitas as três camadas como descrito em norma. Por fim, foi realizado o arrasamento da superfície,

com o auxílio de uma espátula, e a limpeza no entorno do molde de partículas de graute que caíram durante o preenchimento.

Figura 26 - Preenchimento do tronco de cone



Fonte: Autoras

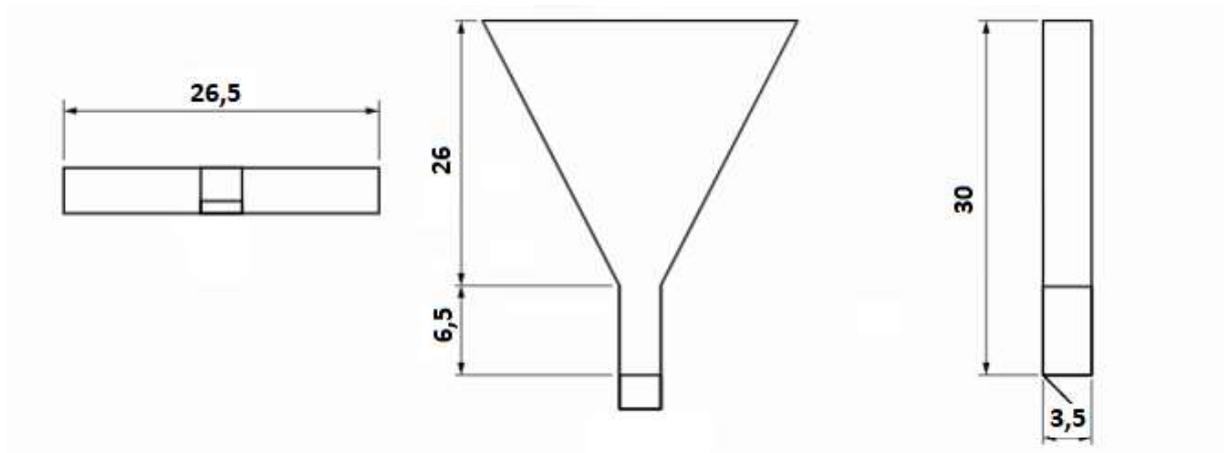
Depois do preenchimento do tronco de cone, o molde foi retirado verticalmente. Novamente, como o graute é autoadensável, não foram aplicados os golpes descritos em norma.

Para finalizar, foram retiradas as medidas de dois diâmetros perpendiculares do espalhamento, com o auxílio de um paquímetro.

- Funil V

Para a determinação da viscosidade, foi realizado o ensaio adaptado da ABNT NBR 15823-5 (2017), por meio do método que utiliza o funil V, de mesma geometria mas com dimensões reduzidas (Figura 27 e Figura 28).

Figura 27 - Dimensões funil V (em centímetros)



Fonte: autoras

Figura 28 - Funil V



Fonte: Autoras

Inicialmente todo o equipamento foi limpo e umedecido para a execução do ensaio. O funil foi preenchido completamente por graute pelo topo enquanto o fundo permanecia bloqueado. Um recipiente foi colocado logo abaixo do funil para receber o graute que seria escoado (Figura 29).

Figura 29 - Preenchimento do funil V.



Fonte: Autoras

Para a execução do ensaio se faz necessário a determinação do tempo em que, após a abertura da comporta, é possível visualizar verticalmente e através do funil o recipiente logo abaixo dele. Sendo assim, após o preenchimento, o fundo do funil foi aberto e, ao mesmo tempo, disparado o cronômetro para verificar este tempo.

Com essa medida é possível então determinar, indiretamente, a viscosidade do graute.

- Massa Específica e Teor de Ar Incorporado

A determinação da massa específica foi feita de acordo com o ensaio apresentado na ABNT NBR 13278 (2005). Para isso, foi utilizado um recipiente de volume já conhecido, igual a  $433,82 \text{ cm}^3$ , e massa também conhecida, igual a  $389,46 \text{ g}$ .

O recipiente foi completamente preenchido com graute e o arrasamento da superfície foi realizado com o auxílio de uma espátula. Como o graute é

autoadensável, não foram feitas camadas como descrito em norma. Ao fim do preenchimento foram realizadas três pequenas batidas do recipiente na bancada, de forma a retirar os vazios (Figura 30).

Figura 30 - Recipiente contendo graute para determinação da massa específica.



Fonte: Autoras

Para finalizar o ensaio, o recipiente foi pesado e as massas anotadas. Os cálculos para a obtenção da massa específica do graute podem ser realizados por meio da equação (7), obtida em norma.

$$d = \frac{m_c - m_v}{v_r} \times 1000 \quad (7)$$

onde:

$d$  é a densidade do graute, em kg/m<sup>3</sup>;

$m_c$  é a massa do recipiente contendo graute, em gramas;

$m_v$  é a massa do recipiente vazio, em gramas;

$v_r$  é o volume do recipiente, em cm<sup>3</sup>.

Além da massa específica, é possível determinar também o teor de ar incorporado das misturas, através da equação (8):

$$A = 100 \times \left(1 - \frac{d}{d_t}\right) \quad (8)$$

onde:

$A$  é o teor de ar incorporado, em %;

$d$  é a massa específica do graute, em g/cm<sup>3</sup>;

$d_t$  é a densidade teórica do graute, em g/cm<sup>3</sup>.

A densidade teórica da argamassa pode ser calculada através da equação, retirada de norma.

$$d_t = \frac{\sum m_i}{\sum \frac{m_i}{\gamma_i}} \quad (9)$$

sendo:

$m_i$  a massa seca de cada componente do graute, mais a massa da água, em gramas;

$\gamma_i$  a massa específica de cada componente da argamassa.

### 3.2.4 PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO

- Moldagem dos corpos de prova

Quanto às propriedades no estado endurecido do graute, foram analisadas duas delas: resistência à compressão e variação volumétrica. Dessa forma, para cada um desses ensaios foram necessárias moldagens específicas de corpos de prova.

Para o ensaio de resistência à compressão foram moldados, para cada traço, 4 (quatro) corpos de prova cilíndricos, sendo 2 (dois) para o rompimento com a idade de 7 dias e 2 (dois) para o rompimento com 28 dias, totalizando 24 corpos de prova (Figura 31). As dimensões desses corpos de prova devem ser, de acordo com a ABNT NBR 7215 (2019) de  $(50 \pm 0,2)$  mm para o diâmetro interno e  $(100 \pm 0,5)$  mm para altura.

Figura 31 - Alguns dos corpos de provas cilíndricos usados no ensaio de resistência à compressão



Fonte: Autoras

Na realização da moldagem dos corpos de prova cilíndricos, inicialmente foi verificado se o molde estava adequadamente montado, limpo e lubrificado para receber o material. Em seguida, foi feito o preenchimento do molde de uma só vez, já que se trata de um graute bastante fluido, depois foram feitas 3 leves batidas do corpo de prova na bancada para que ocorresse a adequada acomodação do material dentro do recipiente, e por fim foi feito o rasamento da superfície utilizando uma espátula. Os

corpos de prova foram deixados imóveis por 24 horas, conforme Figura 32, até que pudesse ser realizado o desmolde, e a transferência de todos eles para a câmara úmida, onde permaneceram até o dia do rompimento. Finalmente, antes da realização do ensaio de resistência, os corpos de prova foram fresados para retificação da superfície.

Figura 32 - Corpos de prova moldados e identificados



Fonte: Autoras

Já para o acompanhamento da variação volumétrica do graute, conforme ABNT NBR 15261 (2005), foram moldados 4 (quatro) corpos de prova prismáticos (2,5 x 2,5 x 28,5) cm para cada um dos três traços contendo aditivo redutor de retração (REF + RR, 5% RBRO + RR, 10% RBRO + RR).

A análise da variação volumétrica e a utilização do aditivo redutor de retração é explicada pela necessidade do graute trabalhar em conjunto com os blocos de concreto, de forma monolítica. Para que isso aconteça, é importante que ele não sofra retrações típicas de misturas cimentícias (hidráulica e autógena). Assim, como forma de avaliar a interação entre o resíduo e o aditivo RR, essas misturas foram realizadas.

Para a posterior moldagem dos corpos de prova prismáticos foi necessário primeiro preparar as fôrmas. Dessa forma, além de fazer o encaixe dos pinos que auxiliam nas leituras de variação volumétrica, foi realizada a montagem dos

recipientes de forma que as aberturas prismáticas estivessem bastante firmes, e por fim os moldes foram adequadamente untados com óleo (Figura 33).

Figura 33 - Moldes prismáticos preparados para moldagem



Fonte: Autoras

A moldagem dos corpos de prova prismáticos ocorreu de forma cuidadosa para que o graute conseguisse preencher completamente a abertura do molde, além de envolver adequadamente os pinos. Para isso, o graute foi colocado na fôrma com o auxílio de uma espátula, e com esse mesmo instrumento foram feitos leves golpes por todo o comprimento do molde até que o material estivesse adequadamente acomodado, finalizando com o rasamento da superfície. Ao final desse procedimento, a superfície das formas foi protegida (cura com barreira física) e deixadas imóveis por 24 horas inteiras (Figura 34), até que pudessem ser desmoldados e guardados para as leituras periódicas de variação volumétrica (Figura 35).

Figura 34 - Parte dos corpos de prova prismáticos após moldagem.



Fonte: Autoras

Figura 35 - Corpos de prova prismáticos desmoldados e identificados.



Fonte: Autoras

- Resistência à compressão

A propriedade no estado endurecido de resistência à compressão foi determinada conforme a ABNT NBR 7215 (2019). Portanto, como já foi dito anteriormente, os corpos de prova foram submetidos a cura inicial ao ar durante as primeiras 24 horas no molde, e após esse período foram desmoldados (Figura 36) e transferidos para a câmara úmida, onde permaneceram até as idades de 7 e 28 dias.

Na data do rompimento foi feita a retificação dos corpos de prova, para que assim a tensão fosse igualmente distribuída em sua superfície, e em seguida foram retiradas as medidas de diâmetro e altura de cada um. Depois, foram levados à prensa hidráulica para submetê-los à carga. Os valores de força nos quais ocorreram os rompimentos foram anotados para posterior cálculo das resistências.

Figura 36 - Corpos de prova desmoldados e identificados



Fonte: Autoras

De posse das cargas nas quais ocorreram os rompimentos dos corpos de prova, bastou utilizar a equação (10) proveniente da ABNT NBR 5739 para a determinação das resistências.

$$f_c = \frac{4 \times F}{\pi \times D^2} \quad (10)$$

onde:

$f_c$  é a resistência à compressão, em MPa;

$F$  é a força máxima alcançada, em Newtons (N);

$D$  é o diâmetro do corpo de prova, em milímetros (mm).

- Expansão e retração

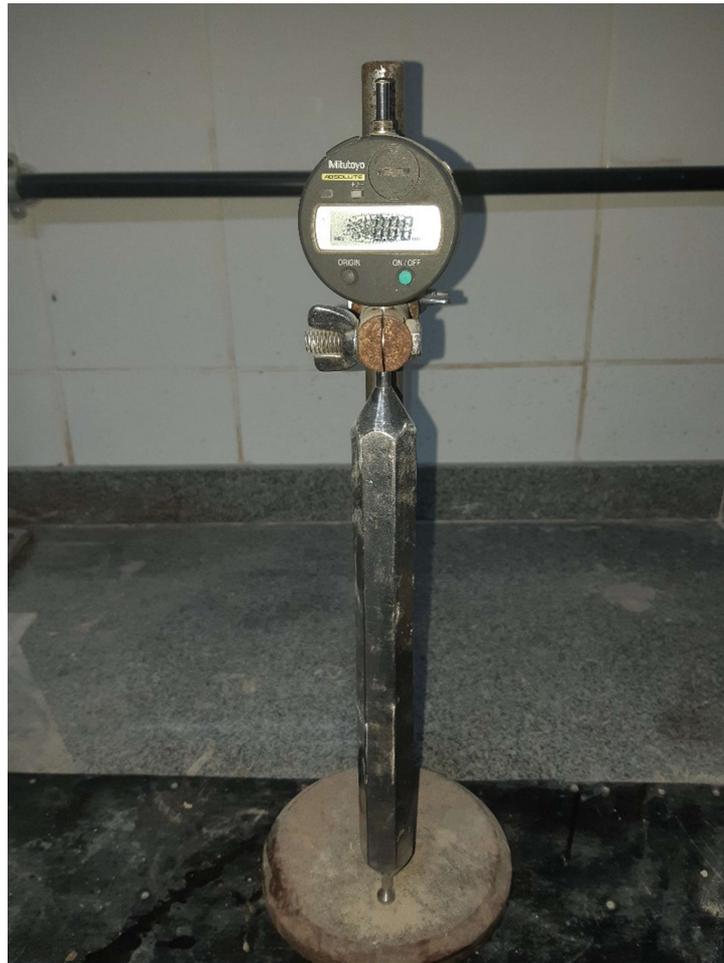
Para a realização do ensaio de variação volumétrica utilizou-se como base a ABNT NBR 15261 (2005). Essa norma instrui sobre a leitura periódica da variação volumétrica de corpos de prova prismáticos nas dimensões 25 x 25 x 285 mm. Esse procedimento é feito com o uso de um equipamento devidamente calibrado e direcionado para esse tipo de análise.

Foram moldados 4 corpos de prova para todos os três traços contendo aditivo redutor de retração, pois assim foi possível fazer uma análise de sua influência na variação volumétrica do graute.

Depois de realizar a moldagem dos corpos de prova prismáticos, conforme descrito no início deste tópico, esperou-se 24 horas para a desmoldagem e a realização da primeira leitura. Os corpos de prova ficaram armazenados em ambiente com umidade em torno de 65%, podendo variar para mais ou para menos, já que não havia ambiente com atmosfera controlável.

Antes de iniciar as leituras a cada dia, foi necessário calibrar o equipamento para que zerasse a referência de medida, como pode ser observado na Figura 37.

Figura 37 - Calibração do equipamento



Fonte: Autoras

Foram feitas aproximadamente 3 leituras de cada corpo de prova por semana até que chegassem à idade de 28 dias. Pode ser observado na Figura 38 a realização da leitura do corpo de prova do traço referência que contém aditivo redutor de retração.

Figura 38 - Leitura de um dos corpos de prova



Fonte: Autoras

Para realizar os cálculos de retração e/ou expansão dos corpos de prova a ABNT NBR 15261 (2005) traz a equação (11) abaixo.

$$\varepsilon_i = \frac{L_i - L_0}{0,25} \times 100 \quad (11)$$

onde:

$\varepsilon_i$  é a medida da variação dimensional, sendo retração quando negativa ou expansão quando positiva, na idade "i", arredondada ao centésimo mais próximo, em milímetros por metro;

$L_i$  é a leitura do corpo de prova na idade i, em milímetros;

$L_0$  é a leitura efetuada após a desforma, em milímetros;

i é a idade de leitura.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

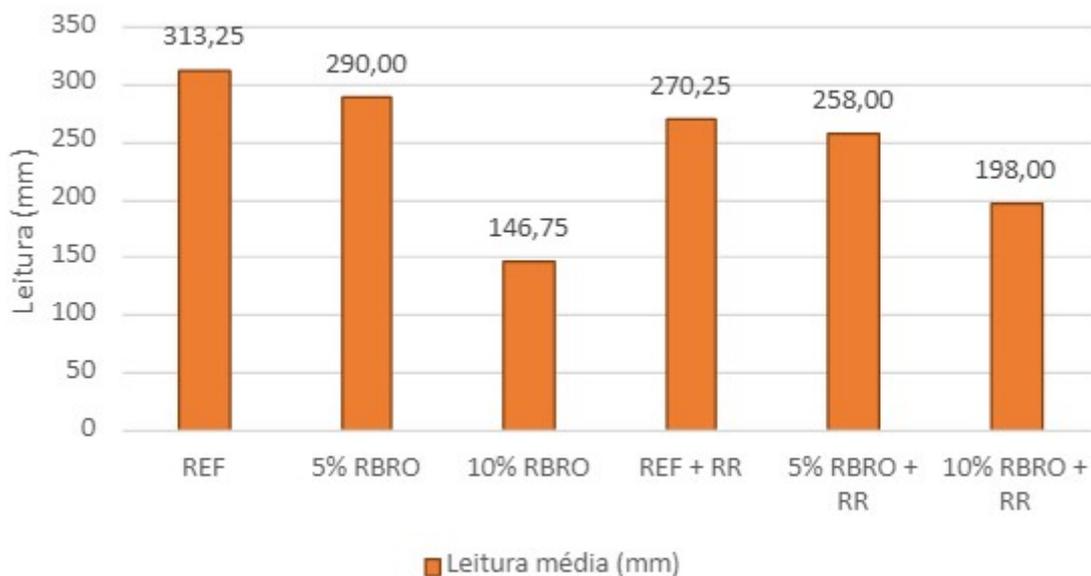
Nesta seção serão apresentados todos os resultados obtidos com os ensaios descritos anteriormente, tanto para as propriedades do estado fresco quanto para o estado endurecido. Além disso, serão feitas análises e comparações entre os seis traços estudados.

### 4.1 PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO

- Índice de Consistência (*Flow Table*)

Os resultados das médias das leituras correspondentes para cada traço são apresentados na Figura 39.

Figura 39 - Resultados de leitura média do *flow table* para os seis traços



Fonte: Autoras

Analisando os resultados, é perceptível que, com o aumento da quantidade de resíduo, o espalhamento é menor, o que indica uma menor fluidez do graute. Ainda assim, a diferença entre o graute referência e o graute com 5% de RBRO é pequena, entre 7 e 4%; enquanto nos traços com 10% de RBRO a redução foi de 53 e 27%, sem e com o uso de aditivo redutor de retração, respectivamente.

A diminuição da fluidez devido à presença do resíduo pode ser explicada pela adição de finos ao graute ao manter a relação a/c constante. Como substituiu-se a areia pelo RBRO, aumentou-se a área superficial das partículas do sistema. A Figura

40 e a Figura 41 mostram o espalhamento dos traços com aditivo redutor de retração e sem o aditivo respectivamente.

Figura 40 - Espalhamento dos grautes com aditivo redutor de retração (REF+RR, 5% RBRO+RR e 10% RBRO+RR)



Fonte: Autoras

Figura 41 - Espalhamento dos grautes sem aditivo redutor de retração (REF, 5% RBRO e 10% RBRO)



Fonte: Autoras

Esse comportamento também foi observado por Martins *et al* (2020) que ao substituir areia por RBRO em grautes verificou redução do espalhamento em 32,56%. Essa diminuição da trabalhabilidade de misturas contendo RBRO se deve especialmente pela alta finura do material, que, como verificado durante a caracterização do resíduo, ultrapassou os 7000 cm<sup>2</sup>/g, e, assim, mantendo a relação a/c constante, a fluidez da mistura diminui.

Fazendo uma comparação entre os três traços sem aditivo redutor de retração e os outros que contém o aditivo, pode-se verificar que sua presença tende a reduzir a fluidez da argamassa, resultando em valores menores de espalhamento, com queda de aproximadamente 14% para o traço referência e de aproximadamente 11% para o traço com 5% de RBRO. Além disso, outro ponto que pôde ser observado é que para o graute com 10% de resíduo, o traço com aditivo redutor de retração obteve espalhamento maior se comparado ao traço com 10% de RBRO sem redutor de retração.

- Tempo de escoamento (Funil V)

O tempo de escoamento determinado no ensaio é apresentado na Figura 42, em segundos, para os seis traços produzidos. O traço com 10% de RBRO sem aditivo redutor de retração não conseguiu escoar completamente, gerando um resultado inconclusivo e indicando que, a partir de um determinado percentual de RBRO, a mistura possui viscosidade inadequada para realização do ensaio.

Analisando os resultados, pode-se verificar que a presença do RBRO influencia significativamente no tempo que o graute leva para escoar, assim como a presença do aditivo redutor de retração.

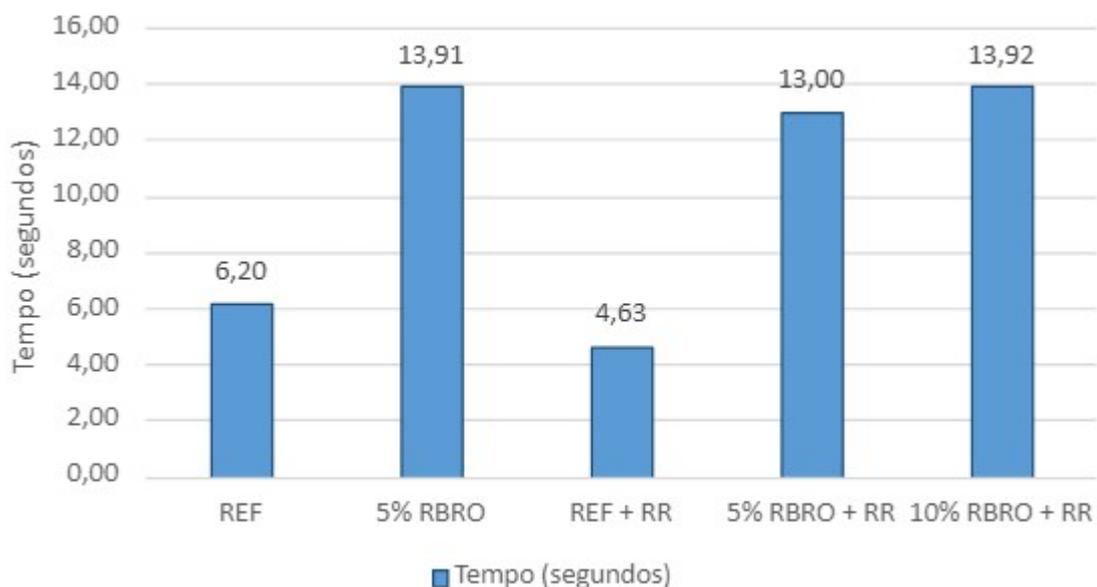
Para as misturas sem o aditivo redutor de retração, percebe-se que houve aumento de aproximadamente 124% do tempo de escoamento do graute referência para o graute com 5% de resíduo, o que indica um aumento de viscosidade.

Para as misturas com o aditivo redutor de retração, a mesma conclusão se aplica, ao aumentar o teor de resíduo, o tempo para escoar também aumenta. Ao comparar as misturas com e sem o aditivo, percebe-se que a presença do redutor de retração reduz o tempo que a mistura leva para escoar. Para o traço referência essa redução foi de 25,3% e para o traço com 5% de RBRO a redução foi de 6,55%. Quanto

a mistura com 10% de RBRO não foi possível comparar, devido ao resultado inconclusivo da mistura sem o aditivo. Isso indica que o aditivo redutor de retração pode ter gerado um efeito de diminuição da viscosidade.

O trabalho de Arpini (2021), que avaliou a utilização do resíduo de rocha ornamental em argamassas autoadensáveis, mostrou que o tempo de escoamento aumentou ao comparar a mistura referência com a mistura com 10% de RBRO. Dessa forma, é possível inferir que foi obtido o resultado esperado, já que a máxima substituição em volume de resíduo analisada no presente estudo foi de 10%, e está de acordo com os resultados obtidos por Arpini (2021) para o mesmo teor.

Figura 42 - Resultados de tempo de escoamento no funil V

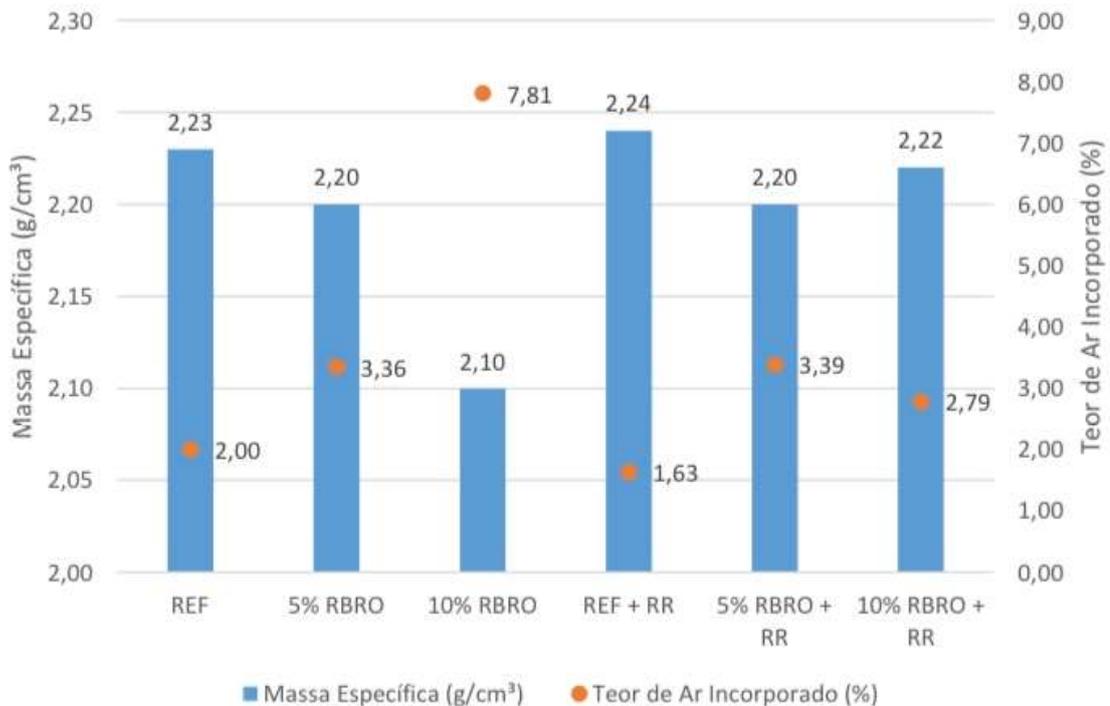


Fonte: Autoras

- Massa Específica

A Figura 43 o resultado final da massa específica e o ar incorporado dos seis traços, obtida de acordo com a Equação 1.

Figura 43 - Resultados de massa específica de cada traço



Fonte: Autoras

Analisando os resultados de massa específica obtidos pode-se perceber que houve pouca diferença entre os valores dos traços referência e a maioria dos traços contendo o resíduo de beneficiamento de rocha ornamental. A exceção foi o traço 10% RBRO, que obteve uma massa específica diferente dos outros traços, pelo aumento do teor de ar incorporado na mistura. Isso pode ser explicado por algum problema de compactação no momento do preenchimento do recipiente, já que se trata de um grante menos fluido, gerando um resultado incoerente com o restante. Além disso, a presença do aditivo redutor de retração também influenciou pouco, mantendo os valores bem parecidos.

Para os traços que contém apenas aditivo superplastificante, houve uma pequena queda da massa específica à medida que se adicionou resíduo. Já para os traços com aditivo redutor de retração o valor caiu para o teor de 5%, enquanto para 10% aumentou.

Tratando do teor de ar incorporado, pôde-se observar que, com exceção da mistura 10% RBRO, todos as demais apresentaram valores entre 1,6 e 3,4%. Isso

ocorreu, pois o cálculo do teor de ar incorporado é função da massa específica, e como essa propriedade determinada para o traço 10% RBRO foi razoavelmente inferior aos outros traços, acabou resultando em um teor de ar incorporado superior aos demais em pelo menos 130%.

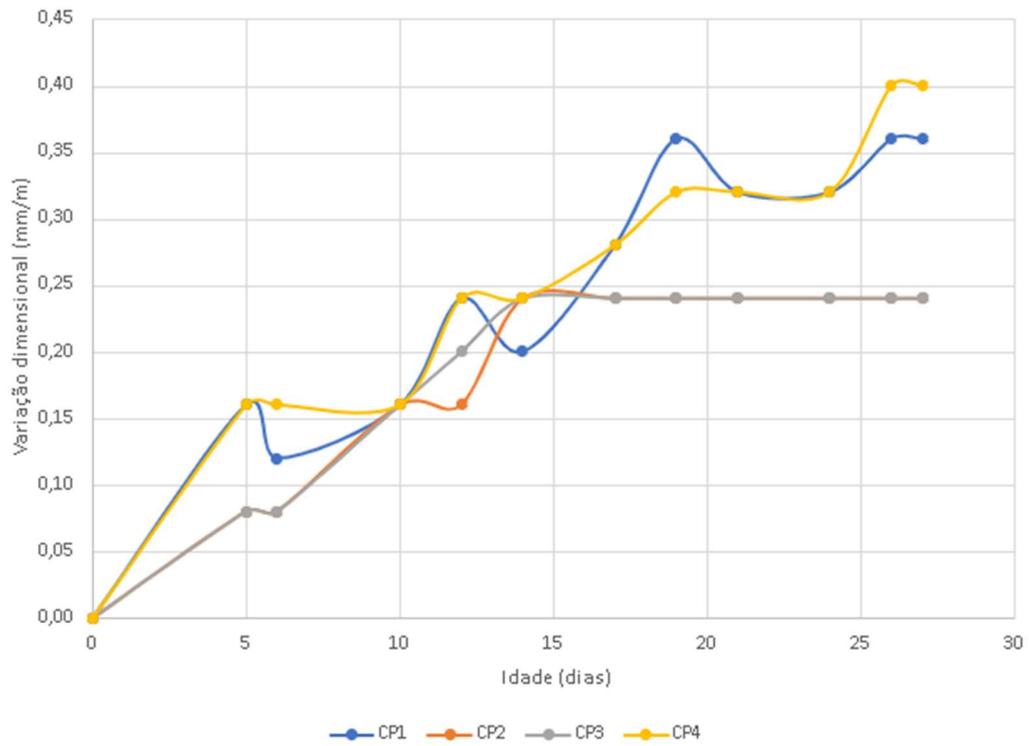
Apolinário (2014) estudou a incorporação de resíduo proveniente do corte e mármore de granito em argamassas de cimento Portland e obteve resultados que mostraram o decréscimo do ar incorporado e o acréscimo da massa específica com o aumento do teor de resíduo. Dessa forma, o resultado obtido não foi esperado, uma vez que, conforme Apolinário (2014), o aumento de finos na mistura deveria resultar em preenchimento de vazios e, conseqüentemente, redução do teor de ar incorporado e aumento da massa específica.

#### 4.2 PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO

- Variação dimensional

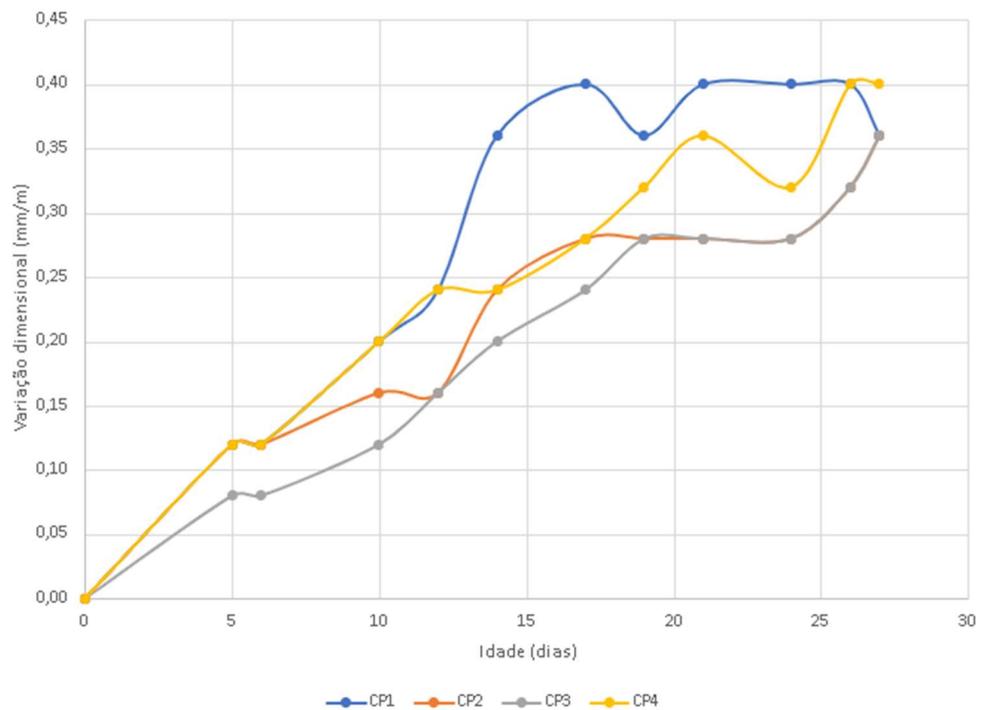
O Apêndice A apresenta, para cada traço ensaiado, as leituras realizadas nos quatro corpos de prova, assim como a variação dimensional ocorrida e a idade em dias. Com esses valores, foram traçados gráficos para cada mistura, que exibem os valores obtidos para os quatro corpos de prova. Os gráficos dos resultados do traço referência + RR (Figura 44) e do traço 5% RBRO + RR (Figura 45) mostram que os quatro CP's obtiveram resultados próximos. Por isso, todos serão considerados na análise final dos resultados. Porém, é importante ressaltar a incoerência dos resultados do CP3 para o traço REF+RR a partir dos 15 dias, que se mantiveram constantes, enquanto os outros CP's continuaram obtendo variação nas leituras.

Figura 44 - Gráfico da variação dimensional versus idade para traço Referência +RR



Fonte: Autoras

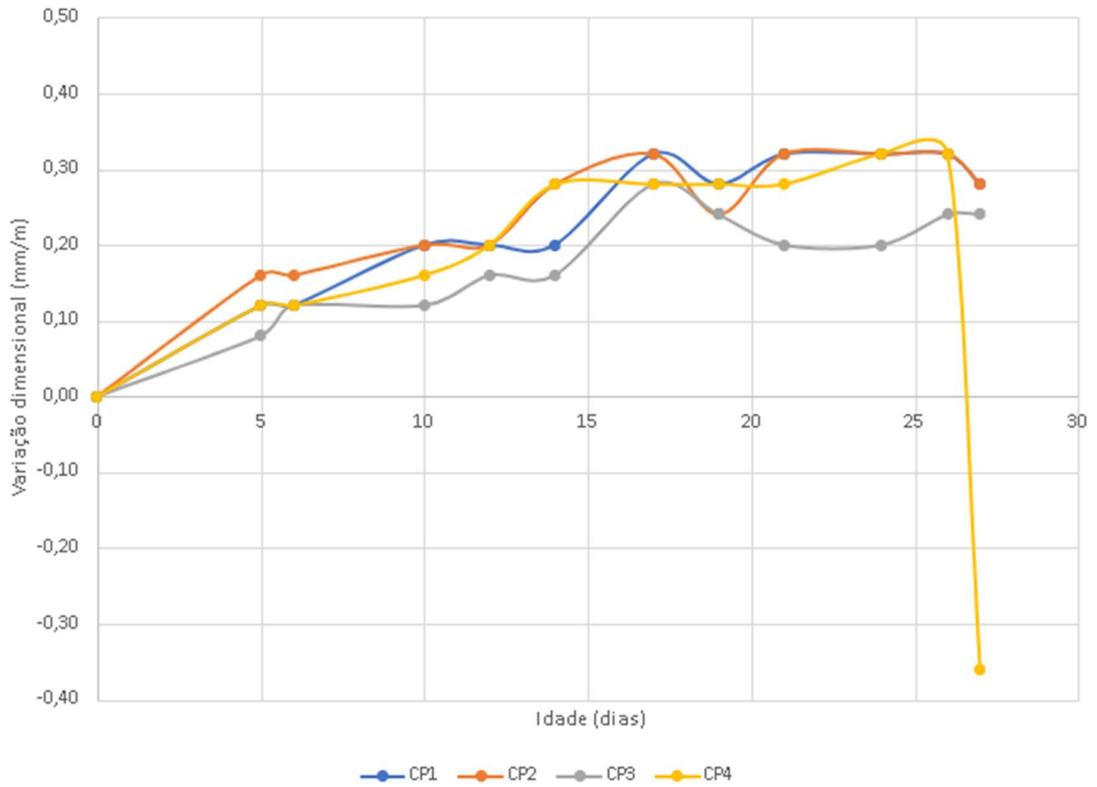
Figura 45 - Gráfico da variação dimensional versus idade para traço 5% RBRO + RR



Fonte: Autoras

O gráfico da mistura 10% RBRO + RR, Figura 46, mostra que a última leitura do CP4 está fora das demais e, assim como no traço referência, esta também será descartada da análise final.

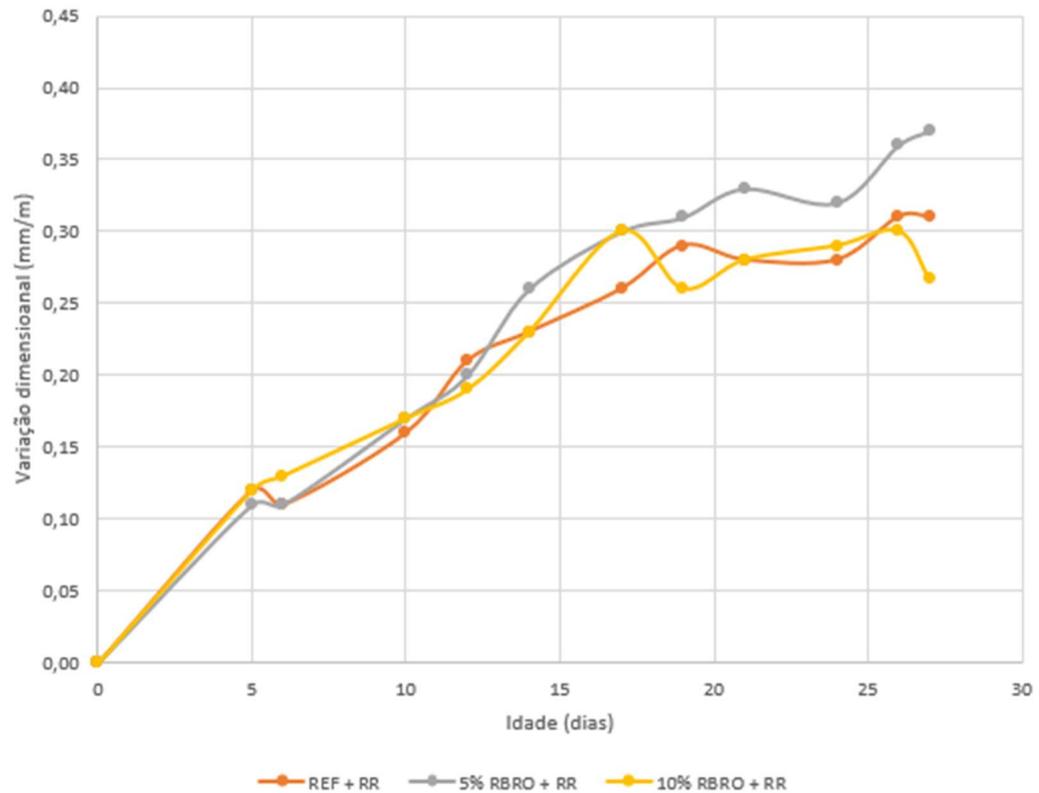
Figura 46 - Gráfico da variação dimensional versus idade para traço 10% RBRO + RR



Fonte: Autoras

Para a análise final dos resultados, desconsiderando os corpos de prova e as leituras citadas anteriormente, foram realizadas as médias das leituras para cada traço e todos foram traçados em um único gráfico, mostrado na Figura 47.

Figura 47 - Gráfico com a média de variação dimensional sofrida por cada traço para fins de comparação



Fonte: Autoras

De posse dos resultados finais mostrados na Figura 47 é possível inferir que todos os traços contendo aditivo redutor de retração não apresentarem reduções volumétricas ao final de 28 dias, apresentando expansões contínuas que não estabilizaram na idade final das medições.

Além disso, pôde-se verificar que o traço 10% RBRO+RR demonstrou um comportamento mais instável com relação à variação volumétrica, uma vez que a curva que representa essa mistura no gráfico da Figura 47 possui inflexões bastante abruptas e de amplitudes consideráveis, como entre os dias 15 e 20, se comparadas às curvas dos outros traços, significando que os corpos de prova sofreram retrações durante o processo geral de expansão, o que pode até mesmo gerar fissuras. Isso pode ter sido causado por eventuais variações de umidade, uma vez que não foi possível manter os CP's em ambiente com umidade totalmente controlada.

Apesar disso, os traços Referência + RR e 5% RBRO + RR apresentaram curvas mais suaves e sem retrações importantes. A mistura 5% RBRO + RR foi a que mais expandiu.

Freitas (2009) analisou a variação dimensional de argamassas autoadensáveis de alta resistência com e sem o uso de aditivo redutor de retração, e pôde verificar que a retração diminuiu em até cerca de 47,3% aos 28 dias com o uso de 2% de aditivo.

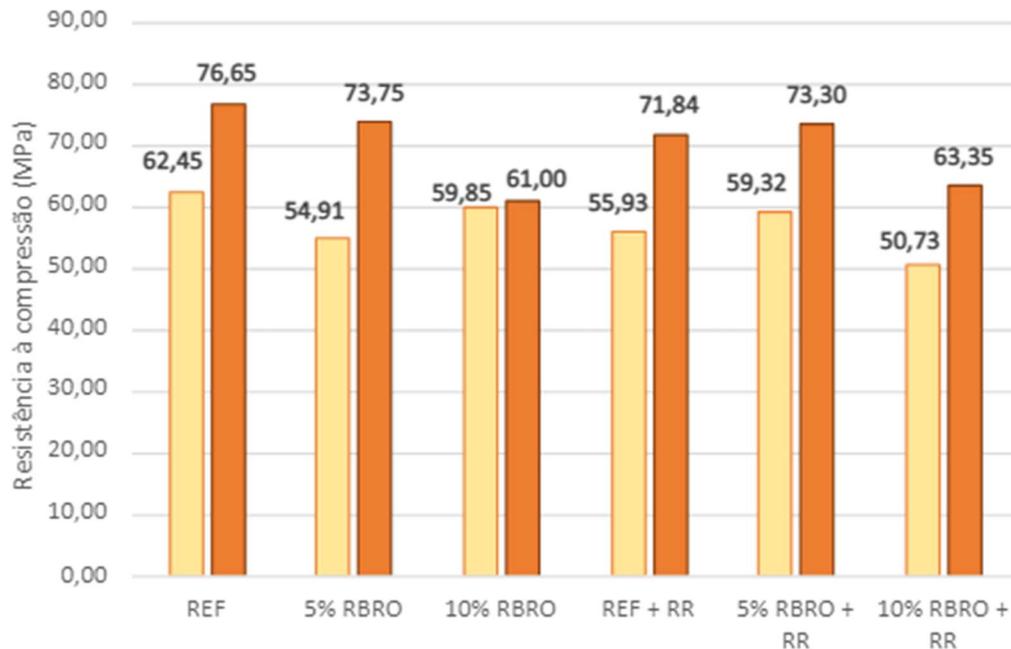
Neto *et al* (2007) também estudaram argamassas executadas com cimento Portland de alta resistência inicial utilizando aditivo redutor de retração em seus traços, e concluíram que a retração desse material diminui ao passo que é aumentada a quantidade de aditivo RR na mistura.

Portanto, no geral, os traços analisados neste trabalho se comportaram de acordo com o que é esperado, ou seja, o uso de aditivo RR proporcionou a expansão dos corpos de prova aproximadamente na mesma faixa de grandeza, já que a quantidade de aditivo usada em todos os traços foi a mesma. E ainda, pôde-se verificar que a presença de resíduo não influenciou nesses resultados.

- Resistência à compressão

Os valores de resistência à compressão para os 7 e 28 dias são mostrados na Figura 48, já calculados através da equação (10).

Figura 48 - Gráfico comparativo contendo os resultados de resistência à compressão aos 7 e 28 dias para cada traço



Fonte: Autoras

Ao analisar os resultados acima, consegue-se verificar que o traço que obteve menor resistência foi o de 10% de RBRO, com e sem aditivo redutor de retração. Esse resultado foi obtido tanto para 7 dias quanto para 28 dias, o que indica que esse teor pode não ser o ideal no quesito resistência.

Com relação aos traços referência e 5% de RBRO sem aditivo RR, houve queda na resistência de 12% para os 7 dias e de 3,8% para os 28 dias. Já nas misturas desses mesmos traços com o aditivo redutor de retração houve aumento da resistência com o uso do resíduo, de 6% para os 7 dias e 2% para os 28 dias.

Martins *et al* (2020) também observaram uma queda na resistência com o uso de RBRO para uma mesma relação água/cimento. Isso pode ter sido causado pela maior incorporação de ar nas misturas, principalmente para o traço de 10% RBRO, conforme já foi apresentado no item sobre propriedades no estado fresco.

Folliard e Berke (1997) estudaram a influência do aditivo redutor de retração na resistência à compressão de argamassas autoadensáveis e notaram que ele tende a diminuir esses resultados. Além disso, Kioumarsi *et al* (2020) também realizaram esse estudo para analisar a influência sobre a resistência de concretos, e inferiu-se que o

aditivo RR reduz a resistência à compressão na mesma proporção com que é aumentada a relação água/cimento.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1 CONCLUSÕES

Ao analisar os dados descritos anteriormente, pode-se concluir que a utilização do RBRO em grautes é uma alternativa possível para escoar parte desse resíduo, uma vez que o estudo obteve resultados satisfatórios.

Em relação as propriedades no estado fresco, os resultados mostram que a massa específica foi pouco influenciada pela adição do resíduo, enquanto o espalhamento diminuiu e o tempo de escoamento aumentou. Isso indica um acréscimo da viscosidade e diminuição da fluidez do graute, o que não é bom para a trabalhabilidade. Esse comportamento era esperado, uma vez que realizou-se a substituição de areia por resíduo, mantendo o consumo de água e aditivo superplastificante inalterada. Porém, a mistura com menor teor de resíduo (5% RBRO + RR) apresentou resultados melhores, com redução de apenas 4,5% no espalhamento. Além disso, a presença do aditivo redutor de retração diminuiu em 25,3% o tempo de escoamento para a mistura referência e em 6,55% para a mistura com 5% de RBRO, ou seja, proporcionou maior trabalhabilidade ao graute.

Além disso, o teor de ar incorporado aumentou, de forma geral, ao passo que se aumentou a quantidade de resíduo nas misturas, o que contraria os resultados esperados, já que o aumento de material fino deveria promover o preenchimento dos vazios, resultando em menores teores de ar incorporado. Contudo, esse fenômeno explica o motivo de as misturas, apesar de apresentarem igual relação água/cimento, terem resultados cada vez mais baixos de resistência à compressão à medida que é aumentada a quantidade de RBRO. Uma hipótese para esse comportamento pode ser a não otimização granulométrica para um melhor empacotamento das partículas.

Já no caso das propriedades no estado endurecido, todos os traços apresentaram resistência superior a 50 MPa, tanto aos 7 dias quanto aos 28 dias. Apesar da redução de resistência do traço com 10% de RBRO, as misturas com 5% de RBRO obtiveram valores próximos do traço referência, mesmo com aditivo RR. Sobre a variação dimensional, o uso do resíduo também não trouxe danos para os resultados, uma vez que todos os três traços ensaiados expandiram ao final dos 28 dias. Não houve diferenças entre a mistura referência e as misturas com resíduo, o

que indica que a estabilidade dimensional não é influenciada pela interação entre aditivo e resíduo.

De forma geral, conclui-se que a mistura com teor de RBRO igual a 5% obteve o melhor desempenho, indicando que existe um teor ótimo de resíduo que consegue atender às propriedades necessárias e ao mesmo tempo auxilia na diminuição dos impactos ambientais gerados por ele. E por fim, infere-se também que teores acima de 5% de RBRO não são ideais, e podem prejudicar principalmente a trabalhabilidade, que é uma propriedade de suma importância para grautes usados em alvenaria estrutural.

## 6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O estudo mostrou que a utilização do resíduo de beneficiamento de rocha ornamental em grautes, além de oferecer vantagens ambientais e econômicas, trouxe resultados que tornam o seu uso propício. Dessa forma, torna-se válido o avanço da pesquisa, com as seguintes sugestões:

- Utilização do RBRO de outras origens mineralógicas, como mármore;
- Avaliação de outras propriedades do graute, além das estudadas, como módulo de elasticidade e resistência à tração;
- Testes reais em alvenaria, com a moldagem de corpos de prova de prisma e a realização de ensaios para analisar o desempenho do graute em conjunto com a alvenaria.

## 7. REFERÊNCIAS

ARAÚJO, H. N. Intervenção em obra para implantação do processo construtivo em alvenaria estrutural: Um estudo de caso. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 1995.

ARAÚJO, L. Influência mecânica da substituição parcial do cimento portland por resíduo de cerâmica vermelha no graute utilizado em alvenaria estrutural de blocos cerâmicos. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) - Universidade Federal Rural do Semiárido, RN. 2018

AREL, H. S. Recyclability of waste marble in concrete production. Journal of Cleaner Production. 2015.

ARPINI, J. L. G. Utilização do resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais como adição mineral em argamassas autoadensáveis. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória. 2021.

ASSOCIAÇÃO MERCOSUL DE NORMALIZAÇÃO (2000). NM23: Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2015). ABNT NBR 16372: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine). Rio de Janeiro.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2016). ABNT NBR 6136: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria estrutural. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2020). ABNT NBR 16868-1: Alvenaria estrutural – Parte 1: Projeto. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2020). ABNT NBR 16868-2: Alvenaria estrutural – Parte 2: Execução e controle de obras. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2017). ABNT NBR 15270-2: Componentes cerâmicos – Blocos e tijolos para alvenaria – Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2017). ABNT NBR 15823-2: Concreto autoadensável Parte 2: Determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual – Método do cone de Abrams. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2017). ABNT NBR 15823-5: Concreto autoadensável Parte 5: Determinação da viscosidade – Método do funil V. Rio de Janeiro.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2020). ABNT NBR 16889: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro.

ASTM INTERNATIONAL (1999). ASTM C157 - 99: Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete.

ASTM INTERNATIONAL (2007). ASTM C404 - 06: Standard Specification for Aggregates for Masonry Grout. West Conshohocken.

ASTM INTERNATIONAL (2012). ASTM C1019 - 11: Standard Test Method for Sampling and Testing Grout. West Conshohocken.

ASTM INTERNATIONAL (2014). ASTM C39/C39M - 14: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. West Conshohocken.

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). Universidade Federal da Bahia. 2014.

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

BASTOS, R. S. et al. Revisão bibliográfica dos estudos sobre a aplicação da lama do beneficiamento de rochas ornamentais na produção de materiais de construção. IBRACON. 2013.

BROMERCHENKEI, L. H. *et al.* Dosagem de graute para alvenaria estrutural. IBRACON. 2019.

CAMACHO, J. S. Projetos de Edifícios de Alvenaria Estrutural. São Paulo, Escola Politécnica, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. 2006.

CAMPOS, A. R. *et al.* Resíduos: tratamento e aplicações industriais. In: VIDAL, Francisco W. H.; CARVALHO, Hélio A. A.; CASTRO, Nuria F. (Ed.). TECNOLOGIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS: Pesquisa, lavra e beneficiamento. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2014.

CAMPOS, A. R. *et al.* Tratamento e aproveitamento de resíduos de rochas ornamentais. Ouro Preto, MG. 2007.

CAVALHEIRO, O. P. Alvenaria estrutural: tão antiga e tão atual. *Jornal da ANICER*, Porto Alegre. Publicado em: 31 jul. 1998.

CHIODI FILHO, C. Tipologia das rochas ornamentais. ABIROCHAS. 2018.

DUPIM, R. H. Resistência residual de compressão de blocos, prismas e pequenas paredes de alvenaria estrutural de blocos de concreto submetidos à situação de incêndio. 2019. Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil) - São Carlos, 2019.

FILHO, R. S. *et al.* Atlas de rochas ornamentais do estado do Espírito Santo. Espírito Santo. 2013.

FOLLIARD, K. J.; BERKE N. S. Properties of high-performance concrete containing shrinkage-reducing admixture. *Cement and Concrete Research*, v. 27, nº 9, September 1997, pp. 1357-1364.

FOSTER, A.; ROBERTO S. S.; IGARI, A. T. Economia circular e resíduos sólidos: uma revisão sistemática sobre a eficiência ambiental e econômica. ENGEMA. 2016.

FREITAS, J. C.; Uso de aditivo redutor de retração no combate à retração em argamassas auto-adensáveis de alta resistência. Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2009.

GALETAKIS, M.; SOULTANA, A. A review on the utilization of quarry and ornamental stone industry fine by-products in the construction sector. School of Mineral Resources Engineering, Technical University of Crete, Chania, Greece. 2016.

GHIRARD, G. C. *et al.* Avaliação do uso de resíduos da indústria de rochas ornamentais em produtos de matriz cimentícia: uma revisão sistemática. V SIINTEC. 2019.

GUARIN, A. S.; MOLINA, J. S.; DÍAZ, J. C. L. Uso de nutrientes tecnológicos como materia prima en la fabricación de materiales de construcción en el paradigma de la economía circular. *Respuestas*. Colômbia. 2016

KATO, R. B. Comparação entre o sistema construtivo convencional e o sistema construtivo em alvenaria estrutural segundo a teoria da construção enxuta. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2002.

KHAN, M. I. *et al.* Design optimization and statistical modeling of cementitious grout containing irradiated plastic waste and silica fume using response surface methodology. Elsevier. 2020

KIOUMARSI, M. *et al.* Effect of Shrinkage Reducing Admixture on Drying Shrinkage of Concrete with Different w/c Ratios. *Materials*. 2020

LOPES, K. L. Avaliação de argamassa com incorporação de resíduos de beneficiamento de rochas ornamentais. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). UNESP. 2020

LOPES, J. L. M. P. Influência da utilização do resíduo de beneficiamento de mármore e granito (RBMG), como fíler, nas propriedades do concreto. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente). Universidade Federal De Goiás. 2007.

MARTINS, G. A. *et al.* Análise Técnica da Utilização do Resíduo de Corte de Mármore e Granito na Dosagem de Graute. IBRACON. 2020.

MOHAMAD, G. *et al.* Construções em Alvenaria Estrutural. 2015.

MELLO, R. Z. Avaliação do ciclo de vida da utilização do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais em materiais de construção civil à base de cimento. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Espírito Santo. 2018.

NEPOMUCENO, M. C. S. *et al.* Cement-based grouts for masonry consolidation with high content of limestone filler, metakaolin, glass powder and ceramic waste. Elsevier. 2021.

NESSRALLA, M. A. Resistência à compressão de paredes de alvenaria estrutural: bloco cerâmico de 44cm. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2013.

NETO, A. A. M. *et al.* Efeito do aditivo redutor de retração (SRA) no cimento portland de alta resistência inicial. Congresso Construção. Universidade de Coimbra, Portugal. 2007.

O QUE fazer com os resíduos das rochas ornamentais? Jornal da UNICAMP, p. 1, 24 abr. 2017.

OLIVEIRA, J. C. P. *et al.* Estudo de concreto autoadensável com incorporação de escória de alto-forno resfriada ao ar moída. 2019. 72 f. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2019.

PARSEKIAN, G. A.; HAMID, A.A.; DRYSDALE, R. G. Comportamento e dimensionamento de alvenaria estrutural. v. 2. São Carlos, SP. EdUFSCar, 2014.

PRUDÊNCIO JÚNIOR, L.R. *et al.* Alvenaria estrutural de blocos de concreto. Florianópolis: Palotti, 2002.

RAMALHO, M. A.; CORRÊA, M. R. S. Projeto de edifícios de alvenaria estrutural. São Paulo, Pini, 2003.

RIBEIRO, S. V. Reutilização de resíduo de rocha ornamental na produção de tijolo solo-cimento. Dissertação (Mestrado em Engenharia). UENF. 2013.

ROCHAS Ornamentais. Disponível em: <https://www.es.gov.br/rochas-ornamentais>. Acesso em: 6 ago. 2021.

ROMAN, H. Manual de alvenaria estrutural com blocos cerâmicos. 2017.

SANTOS, M. M. A.; DESTEFANI, A. Z.; HOLANDA, J. N. F. Caracterização de resíduos de rochas ornamentais provenientes de diferentes processos de corte e beneficiamento. Revista Matéria V.18 N.04. RJ. 2013.

TAUIL, C. A.; NESE, F. J. M. Alvenaria Estrutural. 1. ed. São Paulo. Editora Pini. 2010.

TEIXEIRA, J. E. S. L *et al.* Contribution to the rheological study of cementitious pastes with addition of residues from the processing of ornamental rocks. IBRACON. 2018.

TOPÇU, I. B. *et al.* Effect of waste marble dust content as filler on properties of self-compacting concrete. Construction and Building Materials. 2008.

VAZZOLER, J. S. *et al.* Investigation of the potential use of waste from ornamental stone processing after heat treatment for the production of cement-based paste. Construction and Building Materials. 2018.

YIN, W. *et al.* Utilization of waste glass powder as partial replacement of cement for the cementitious grouts with superplasticizer and viscosity modifying agent binary mixtures: Rheological and mechanical performances. Elsevier. 2021.

ÇINAR, M. *et al.* The measurement of fresh properties of cement-based grout containing waste marble powder. Elsevier. 2019.

## APÊNDICE A – DADOS DO ENSAIO DE VARIAÇÃO DIMENSIONAL

Tabela 6 - Leituras e variações dimensionais calculadas (traço referência + aditivo redutor de retração)

Idade i (dias)	Referência + adit. RR.							
	CP 1		CP 2		CP 3		CP 4	
	Leitura (mm)	Variação dim. na idade "i" (mm/m)	Leitura (mm)	Variação dim. na idade "i" (mm/m)	Leitura (mm)	Variação dim. na idade "i" (mm/m)	Leitura (mm)	Variação dim. na idade "i" (mm/m)
0	0,10	0,00	0,92	0,00	0,87	0,00	1,73	0,00
5	0,14	0,16	0,94	0,08	0,89	0,08	1,77	0,16
6	0,13	0,12	0,94	0,08	0,89	0,08	1,77	0,16
10	0,14	0,16	0,96	0,16	0,91	0,16	1,77	0,16
12	0,16	0,24	0,96	0,16	0,92	0,20	1,79	0,24
14	0,15	0,20	0,98	0,24	0,93	0,24	1,79	0,24
17	0,17	0,28	0,98	0,24	0,93	0,24	1,80	0,28
19	0,19	0,36	0,98	0,24	0,93	0,24	1,81	0,32
21	0,18	0,32	0,98	0,24	0,93	0,24	1,81	0,32
24	0,18	0,32	0,98	0,24	0,93	0,24	1,81	0,32
26	0,19	0,36	0,98	0,24	0,93	0,24	1,83	0,40
27	0,19	0,36	0,98	0,24	0,93	0,24	1,83	0,40

Fonte: Autoras

Tabela 7 - Leituras e variações dimensionais calculadas (traço 5% + aditivo redutor de retração)

Idade i (dias)	5% + adit. RR.							
	CP 1		CP 2		CP 3		CP 4	
	Leitura (mm)	Varição dim. na idade "i" (mm/m)						
0	5,65	0,00	0,42	0,00	1,94	0,00	1,52	0,00
5	5,68	0,12	0,45	0,12	1,96	0,08	1,55	0,12
6	5,68	0,12	0,45	0,12	1,96	0,08	1,55	0,12
10	5,70	0,20	0,46	0,16	1,97	0,12	1,57	0,20
12	5,71	0,24	0,46	0,16	1,98	0,16	1,58	0,24
14	5,74	0,36	0,48	0,24	1,99	0,20	1,58	0,24
17	5,75	0,40	0,49	0,28	2,00	0,24	1,59	0,28
19	5,74	0,36	0,49	0,28	2,01	0,28	1,60	0,32
21	5,75	0,40	0,49	0,28	2,01	0,28	1,61	0,36
24	5,75	0,40	0,49	0,28	2,01	0,28	1,60	0,32
26	5,75	0,40	0,50	0,32	2,02	0,32	1,62	0,40
27	5,74	0,36	0,51	0,36	2,03	0,36	1,62	0,40

Fonte: Autoras

Tabela 8 - Leituras e variações dimensionais calculadas (traço 5% + aditivo redutor de retração)

Idade i (dias)	10% + adit. RR.							
	CP 1		CP 2		CP 3		CP 4	
	Leitura (mm)	Varição dim. na idade "i" (mm/m)						
0	0,53	0,00	2,42	0,00	-1,23	0,00	2,54	0,00
5	0,56	0,12	2,46	0,16	-1,21	0,08	2,57	0,12
6	0,56	0,12	2,46	0,16	-1,20	0,12	2,57	0,12
10	0,58	0,20	2,47	0,20	-1,20	0,12	2,58	0,16
12	0,58	0,20	2,47	0,20	-1,19	0,16	2,59	0,20
14	0,58	0,20	2,49	0,28	-1,19	0,16	2,61	0,28
17	0,61	0,32	2,50	0,32	-1,16	0,28	2,61	0,28
19	0,60	0,28	2,48	0,24	-1,17	0,24	2,61	0,28
21	0,61	0,32	2,50	0,32	-1,18	0,20	2,61	0,28
24	0,61	0,32	2,50	0,32	-1,18	0,20	2,62	0,32
26	0,61	0,32	2,50	0,32	-1,17	0,24	2,62	0,32
27	0,60	0,28	2,49	0,28	-1,17	0,24	2,45	-0,36

Fonte - Autoras