



Universidade Estadual Paulista
"Júlio de Mesquita Filho"
Programa Interunidades

unesp 


Mestrado

Engenharia Civil e Ambiental

FLORENCE REZENDE LEITE

**O POTENCIAL USO DE RESÍDUOS DE BENEFICIAMENTO DE
ROCHAS ORNAMENTAIS COMO MATÉRIA-PRIMA EM
ARGAMASSAS E SUA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV)**

Sorocaba
2019



FLORENCE REZENDE LEITE

**O POTENCIAL USO DE RESÍDUOS DE BENEFICIAMENTO DE
ROCHAS ORNAMENTAIS COMO MATÉRIA-PRIMA EM
ARGAMASSAS E SUA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV)**

Dissertação apresentada como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Área de Concentração Saneamento.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Maria Lúcia
Pereira Antunes

Sorocaba
2019



Leite, Florence Rezende.

O potencial uso de resíduos de beneficiamento de rochas ornamentais como matéria-prima em argamassas e sua avaliação do ciclo de vida (ACV) / Florence Rezende Leite, 2019

117 f. : il.

Orientadora: Maria Lúcia Pereira Antunes

Dissertação (Mestrado)- Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2019

1. Rochas ornamentais. 2. Resíduo de corte. 3. Resíduo de polimento. 4. Argamassas. 5. Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Bauru



ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE FLORENCE REZENDE LEITE, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 04 dias do mês de julho do ano de 2019, às 14:00 horas, no(a) Sala A3 - ICT\Sorocaba, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof^a. Dr^a. MARIA LUCIA PEREIRA ANTUNES SILVA - Orientador(a) do(a) Departamento de Engenharia Ambiental / ICT - Unesp / Sorocaba, Prof^a. Dr^a VIRGÍNIA APARECIDA DA SILVA MORIS do(a) Departamento de Engenharia de Produção / UFSCar / Sorocaba, Prof. Dr. DANIEL BERTOLI GONÇALVES do(a) Departamento de Engenharia / Universidade de Sorocaba, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de FLORENCE REZENDE LEITE, intitulada **O POTENCIAL USO DE RESÍDUOS DE BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS COMO MATÉRIA-PRIMA EM ARGAMASSAS E SUA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV)**. Após a exposição, a discente foi arguida oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADA. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

Prof^a. Dr^a. MARIA LUCIA PEREIRA ANTUNES SILVA

Prof^a. Dr^a VIRGÍNIA APARECIDA DA SILVA MORIS

Prof. Dr. DANIEL BERTOLI GONÇALVES

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha mãe, Ângela Aparecida Rezende Leite, e ao meu pai, Antonio Carlos Leite, pelo grande incentivo em toda minha jornada.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por iluminar meus passos e sempre me guiar para o melhor caminho.

Aos meus pais, Ângela Aparecida Rezende Leite e Antonio Carlos Leite, pelo apoio e amor imensuráveis.

Ao meu irmão, João Paulo Rezende Leite, pela grande amizade e ajuda em todas as etapas da minha vida.

Às minhas avós, Terezinha Chaves Leite e Maria Aparecida Rezende, pelas orações e por todo carinho.

À professora e orientadora Prof.^a Dr.^a Maria Lucia Pereira Antunes por toda ajuda, confiança e conhecimento transmitido.

Ao Prof. Dr. Diogo Aparecido Lopes Silva (UFSCar/Sorocaba) pelo grande incentivo e auxílio na Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) deste trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da UNESP e a todos os professores pelo grande aprendizado que obtive durante esta jornada.

A todos os funcionários da UNESP, campus Sorocaba, por me acolherem tão bem.

Aos colegas Me. Paulo Silas Oliveira, Me. Carime dos Santos Souza e Alexandre Bertolaccini Vergani pela valiosa ajuda nos ensaios.

Aos professores e técnicos do Laboratório de Ensaios de Materiais (LEMAT) da Faculdade de Engenharia de Sorocaba (FACENS), em especial à Prof.^a Karina Leonetti Lopes e ao técnico Luiz Augusto Pereira Alves, por abrirem as portas para a confecção dos corpos de prova e para que os ensaios de tração na flexão e compressão deste trabalho pudessem ser realizados da melhor forma possível.

Aos professores, técnicos e colegas do Laboratório Multiusuário de Caracterização de Materiais (LMCMat) da UNESP de Sorocaba, em especial à Prof.^a Dr.^a Elidiane Cipriano Rangel e ao Prof. Dr. Nilson Cristino da Cruz, pela colaboração nos ensaios de MEV, EDS e DRX.

Ao Laboratório de Água e Solos da UNESP de Sorocaba/SP pelas análises granulométricas.

À marmoraria M2 de Sorocaba/SP pelo fornecimento das lamas de resíduos para este trabalho.

À CAPES, pela bolsa de mestrado concedida.

“Eu sei o preço do sucesso: dedicação, trabalho duro e uma incessante devoção às coisas que você quer ver acontecer.”

Frank Lloyd Wright

RESUMO

No Brasil, o uso de rochas ornamentais para acabamento na construção civil é bastante comum. O beneficiamento secundário dessas rochas, a partir do qual são obtidos os produtos finais, é realizado por marmorarias e gera resíduos em forma de lama. Esses resíduos podem causar impactos ao meio ambiente e à saúde humana. O presente trabalho teve como objetivo utilizar os resíduos de beneficiamento secundário de rochas ornamentais em argamassas para dar um destino mais adequado a eles e reduzir o consumo de recursos naturais. Neste trabalho foram utilizados dois tipos de resíduos: resíduo de corte (R1) e resíduo de polimento (R2) de chapas brutas de rochas ornamentais, coletados em uma marmoraria na cidade de Sorocaba, SP. Os resíduos foram secos em estufa, transformados em pó e caracterizados quanto à massa específica, teor de matéria orgânica, granulometria, composição e estrutura química (Espectroscopia de Raios X por Dispersão em Energia (EDS) e Difração de Raios X (DRX)) e morfologia (Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)). Os dois tipos de resíduos foram incorporados, separadamente, em argamassas, utilizando-se o traço de 1:3 (cimento: areia), em massa, em substituição à areia em 10%, 20% e 30%. As argamassas com e sem os resíduos, no estado fresco, foram avaliadas quanto ao índice de consistência. Os corpos de prova prismáticos obtidos foram submetidos a ensaios físico-mecânicos, sendo que, aos 28 dias de cura, os resultados variaram entre: 2,7–5,3MPa na resistência à tração na flexão; 10,0–13,5MPa na resistência à compressão; 1735–2133kg/m³ na densidade aparente; 12,2–13,9% na absorção de água por imersão; 0,11–0,77 g/cm² na absorção por capilaridade; 23,0–25,6% no índice de vazios; 1,83–1,89 g/cm³ na massa específica seca e 2,08–2,12 g/cm³ na massa específica saturada. Todos os resultados foram analisados estatisticamente por análise de variância (ANOVA) para o intervalo de confiança de 95%. Os resultados mostraram que não houve diferença significativa para as propriedades físico-mecânicas analisadas, com exceção da resistência à compressão para a adição de 30% de R2 e absorção por capilaridade para todas as composições avaliadas. Além disso, realizou-se uma Avaliação do Ciclo da Vida (ACV) da produção *cradle-to-gate* das argamassas sem os resíduos e com os resíduos em substituição à areia e também em substituição ao cimento a fim de comparar os impactos potenciais associados a cada uma das substituições. O software OpenLCA 1.6.3 foi utilizado para modelar a ACV e os dados foram retirados dos bancos de dados SICV Brasil e ecoinvent, da literatura e de dados laboratoriais. O método escolhido para avaliar os impactos ambientais do ciclo de vida foi o CML (*baseline*) [v4.4, January 2016], *midpoint*, onde 8 categorias de impacto foram consideradas. Os resultados da ACV mostraram que os menores impactos potenciais ocorreram para a adição de 30% de R1 e R2 nas argamassas, com destaque para a redução de impactos para a categoria de depleção de recursos fósseis. Por fim, concluiu-se que os resíduos de beneficiamento secundário de rochas ornamentais podem ser utilizados como agregados em argamassas, sem alterar significativamente as propriedades físico-mecânicas, e ainda podem contribuir para a redução dos impactos ambientais na perspectiva de ciclo de vida de produto.

Palavras-chave: Rochas Ornamentais. Resíduo de Corte. Resíduo de Polimento. Argamassas. Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).

ABSTRACT

The use of ornamental rocks for finishing in civil construction is quite common in Brazil. The secondary processing of these rocks, which creates the final products, is done by marble factories and generates mud wastes. These wastes can cause impacts on the environment and the human health. Therefore, the present study aimed to use the wastes from secondary processing of ornamental rocks as partial replacements of the sand in mortars, to give them a more appropriate destination and to reduce the natural resources consumption. Two types of wastes were used in this study: waste from the cutting (R1) and the polishing (R2) of crude sheets of ornamental rocks, collected in a marble factory in the city of Sorocaba, SP. The wastes were dried, processed becoming in powder and characterized as specific mass, organic matter content, grain size distribution, composition and chemical structure (by Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS) and X-Ray Diffraction (XRD)) and morphology (by Scanning Electron Microscopy (SEM)). The two types of wastes were separately incorporated in mortars using the trace 1:3 (cement: sand) by mass, replacing the sand by 10%, 20% and 30%. The fresh mortars with and without the wastes were evaluated by consistency index. The specimens obtained were subjected to physical-mechanical tests. At 28 days of age the results varying from: 2.7–5.3MPa in flexural strength; 10.0–13.5MPa in compressive strength; 1735–2133kg/m³ in bulk density; 12.2–13.9% in water absorption by immersion; 0.11–0.77 g/cm² in water absorption by capillarity; 23.0–25.6% in open porosity; 1.83–1.89 g/cm³ in dried specific mass and 2.08–2.12 g/cm³ in saturated specific mass. All the results were statistically analyzed through analysis of variance (ANOVA) for 95% confidence level. The results showed there was no relevant statistical differences for the evaluated physical-mechanical properties, with exception for the compressive strength by varying 30% of R2 and capillarity for all evaluated compositions. Furthermore, a Life Cycle Assessment (LCA) cradle-to-gate of the mortars production with and without the wastes replacing the sand and the cement was performed to compare the potential impacts for each replacement. The free software OpenLCA 1.6.3 was used to model the LCA. The datas to perform the LCA were taken from the databases SICV Brazil and ecoinvent, the literature and laboratories. The method for evaluating the environmental impacts of the life cycle was the CML (baseline) [v4.4, January 2016], midpoint, where 8 impact categories were considered. The LCA results showed that the lowest environmental impacts were observed for 30% of R1 and R2 additions and this could special contribute to avoid the depletion of abiotic resources - fossil fuels impacts. Finally, it was concluded that the secondary processing wastes of ornamental rocks can be used as aggregates for mortars, without modify significantly their physical-mechanical properties, and they can also contribute to the reduction of the environmental impacts.

Key words: Ornamental Rocks. Cutting Waste. Polishing Waste. Mortars. Life Cycle Assessment (LCA).

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Etapas de uma ACV	13
Figura 2: Mármore, granito e quartizitos beneficiados na marmoraria onde os resíduos foram coletados.....	17
Figura 3: Chapas brutas de rochas ornamentais vindas de indústrias de extração e serragem	18
Figura 4: Serra-ponte cortando uma chapa bruta de rocha ornamental	19
Figura 5: Politriz e máquina de corte para acabamentos específicos, utilizadas na marmoraria em estudo	19
Figura 6: Resíduos de corte (R1) (esq.) e de polimento (R2) (dir.) coletados em forma de lama.....	20
Figura 7: Resíduo de corte (esq.) e resíduo de polimento (dir.) armazenados para ensaios	21
Figura 8: Argamassas moldadas descansando até o momento da desmoldagem	27
Figura 9: Corpos de prova desmoldados e identificados	27
Figura 10: Câmara úmida com corpos de prova	28
Figura 11: molde tronco cônico e soquete (esq.) e mesa de adensamento com argamassa após a retirada do molde (dir.)	29
Figura 12: Espalhamento da argamassa após os golpes da mesa de adensamento	29
Figura 13: Ensaio de resistência à tração na flexão	31
Figura 14: Ensaio de resistência à compressão	33
Figura 15: Fronteiras do sistema de produto	39
Figura 16: Análise granulométrica do resíduo de corte	45
Figura 17: Análise granulométrica do resíduo de polimento.....	46
Figura 18: Comparação da porcentagem de massa retida nas peneiras	48
Figura 19: Micrografia do resíduo de corte com aumentos de 100x (esq.) e 1000x (dir.) ..	49
Figura 20: EDS do resíduo de corte.....	49
Figura 21: Micrografia do resíduo de polimento com aumentos de 100x (esq.) e 1000x (dir.)	50
Figura 22: EDS do resíduo de polimento	50
Figura 23: Micrografia da areia com aumentos de 100x (esq.) e 500x (dir)	51
Figura 24: EDS da areia.....	51
Figura 25: Micrografia do cimento com aumentos de 100x (esq.) e 1000x (dir.).....	52
Figura 26: EDS do cimento	52

Figura 27: Difratoograma dos resíduos de corte (R1) e de polimento (R2)	53
Figura 28: índice de consistência das argamassas	55
Figura 29: Densidade aparente em argamassas com resíduo de corte	56
Figura 30: Densidade aparente em argamassas com resíduo de polimento.....	57
Figura 31: Porcentagem de absorção de água das argamassas com resíduo de corte	59
Figura 32: Porcentagem de absorção de água das argamassas com resíduo de polimento .	61
Figura 33: índice de vazios das argamassas com resíduo de corte	62
Figura 34: índice de vazios das argamassas com resíduo de polimento	64
Figura 35: Resistência à tração na flexão de argamassas com resíduo de corte	65
Figura 36: Resistência à tração na flexão de argamassas com resíduo de polimento	67
Figura 37: Resistência à compressão de argamassas com resíduo de corte	69
Figura 38: Resistência à compressão de argamassas com resíduo de polimento	70
Figura 39: Massa específica seca de argamassas com resíduo de corte	73
Figura 40: Massa específica seca de argamassas com resíduo de polimento	75
Figura 41: Massa específica saturada de argamassas com resíduo de corte	76
Figura 42: Massa específica saturada de argamassas com resíduo de polimento	78
Figura 43: Análise de cenários com resultados normalizados – substituição da areia	88
Figura 44: Análise de cenários com resultados normalizados - substituição do cimento ...	89

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Sequências das peneiras no agitador	24
Tabela 2: Proporções de matérias-primas nas misturas das argamassas	26
Tabela 3: Descrição das categorias de impactos consideradas neste estudo	41
Tabela 4: Massa específica dos materiais utilizados nas argamassas	43
Tabela 5: Teor de orgânico dos resíduos de corte e de polimento	44
Tabela 6: Análise granulométrica do resíduo de corte	45
Tabela 7: Análise granulométrica do resíduo de polimento	46
Tabela 8: Análise granulométrica do cimento	47
Tabela 9: Fichas de identificação dos minerais encontrados nos difratogramas	53
Tabela 10: Densidade aparente no estado endurecido aos 28 dias – corpos de prova com resíduo de corte	57
Tabela 11: Densidade aparente no estado endurecido aos 28 dias – corpos de prova com resíduo de polimento	58
Tabela 12: Análise de Variância (ANOVA) - Densidade aparente dos corpos de prova com e sem resíduo de corte	58
Tabela 13: Análise de Variância (ANOVA) - Densidade Aparente dos corpos de prova com e sem resíduo de polimento	58
Tabela 14: Absorção de água por imersão aos 28 dias de cura – corpos de prova com e sem resíduo de corte	60
Tabela 15: Análise de Variância (ANOVA) - Absorção de água por imersão dos corpos de prova com resíduo de corte	60
Tabela 16: Absorção de água por imersão aos 28 dias de cura - corpos de prova com e sem resíduo de polimento	61
Tabela 17: Análise de Variância (ANOVA) - Absorção de água por imersão dos corpos de prova com	62
Tabela 18: índice de vazios aos 28 dias de cura – corpos de prova com resíduo de corte ..	63
Tabela 19: Análise de Variância (ANOVA) - Índice de vazios dos corpos de prova com resíduo de corte	63
Tabela 20: índice de vazios aos 28 dias de cura - corpos de prova com resíduo de polimento	64
Tabela 21: Análise de Variância (ANOVA) - Índice de vazios dos corpos de prova com resíduo de polimento	65

Tabela 22: Resistência à tração na flexão aos 28 dias de cura – corpos de prova com resíduo de corte	66
Tabela 23: Análise de Variância (ANOVA) – Resistência à tração na flexão dos corpos de prova com resíduo de corte	66
Tabela 24: Resistência à tração na flexão aos 28 dias de cura – corpos de prova com resíduo de polimento	67
Tabela 25: Análise de Variância (ANOVA) - Resistência à tração na flexão dos corpos-de-prova com	68
Tabela 26: Resistência à compressão aos 28 dias de cura – corpos de prova com resíduo de corte	69
Tabela 27: Análise de Variância (ANOVA) - Resistência à compressão dos corpos de prova com resíduo de corte	70
Tabela 28: Resistência à compressão aos 28 dias de cura – corpos de prova com resíduo de polimento	71
Tabela 29: Análise de Variância (ANOVA) - Resistência à compressão dos corpos-de-prova com resíduo de polimento	71
Tabela 30: Teste de Tukey - Resistência à compressão dos corpos de prova com e sem resíduo de polimento	72
Tabela 31: Massa específica seca aos 28 dias de cura - corpos de prova com resíduo de corte	73
Tabela 32: Análise de Variância (ANOVA) - Massa específica seca dos corpos de prova com resíduo de corte	74
Tabela 33: Teste de Tukey – Massa específica seca dos corpos de prova com e sem resíduo de corte.....	74
Tabela 34: Massa específica seca aos 28 dias de cura – corpos de prova com resíduo de polimento	75
Tabela 35: Análise de Variância (ANOVA) - Massa específica seca dos corpos de prova com resíduo de polimento	76
Tabela 36: Massa específica saturada aos 28 dias de cura – corpos de prova com resíduo de corte	77
Tabela 37: Análise de Variância (ANOVA) - Massa específica saturada dos corpos de prova com resíduo de corte	77
Tabela 38: Teste de Tukey – Massa específica seca dos corpos de prova com e sem resíduo de corte.....	78

Tabela 39: Massa específica saturada aos 28 dias de cura – corpos de prova com resíduo de polimento	79
Tabela 40: Análise de Variância (ANOVA) - Massa específica saturada dos corpos de prova com resíduo de polimento	79
Tabela 41: Coeficiente de capilaridade e absorção de água por capilaridade aos 28 dias de cura - corpos de prova com resíduo de corte e resíduo de polimento	80
Tabela 42: Análise de Variância (ANOVA) - Coeficiente de capilaridade dos corpos de prova com resíduo de corte	80
Tabela 43: Teste de Tukey – Coeficiente de capilaridade dos corpos de prova com e sem resíduo de corte	80
Tabela 44: Análise de Variância (ANOVA) - Coeficiente de capilaridade dos corpos de prova com resíduo de polimento	81
<i>Tabela 45: Teste de Tukey – Coeficiente de capilaridade dos corpos de prova com e sem resíduo de polimento</i>	<i>81</i>
Tabela 46: Resultado da análise dos inventários da produção de 3,93kg de argamassas com e sem R1 substituindo a areia	83
Tabela 47: Resultado da análise dos inventários da produção de 3,93kg de argamassas com e sem R2 substituindo a areia	84
Tabela 48: Resultado da análise dos inventários da produção de 3,93kg de argamassas com e sem R1 substituindo o cimento	85
Tabela 49: Resultado da análise dos inventários da produção de 3,93kg de argamassas com e sem R2 substituindo o cimento	85
Tabela 50: Impactos potenciais em cada cenário – substituição da areia em 3,93kg de argamassa.....	87

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	IV
RESUMO	VI
ABSTRACT	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE TABELAS.....	X
SUMÁRIO	XIII
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	3
2.1 OBJETIVO GERAL.....	3
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1 ROCHAS ORNAMENTAIS	4
3.1.1 <i>Breve histórico do uso de rochas ornamentais</i>	4
3.1.2 <i>Obtenção das rochas ornamentais</i>	5
3.1.3 <i>Resíduos de beneficiamento secundário de rochas ornamentais</i>	5
3.2 ARGAMASSAS.....	7
3.2.1 <i>Contexto histórico</i>	7
3.2.2 <i>Definições</i>	8
3.3 USO DE RESÍDUOS DE BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS EM ARGAMASSAS	9
3.4 A VALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) COMO FERRAMENTA PARA ANÁLISE DE DESEMPENHO AMBIENTAL DE MATERIAIS NA CONSTRUÇÃO CIVIL	11
3.4.1 <i>Detalhamento das etapas do ciclo de vida</i>	12
4 MATERIAIS E MÉTODOS	17
4.1 MATERIAIS EMPREGADOS NA CONFECÇÃO DAS ARGAMASSAS	17
4.1.1 <i>Resíduos</i>	17
4.1.2 <i>Aglomerante</i>	21
4.1.3 <i>Agregado</i>	21
4.1.4 <i>Água</i>	21
4.2 MÉTODOS.....	22
4.2.1 <i>Caracterização dos resíduos e das matérias-primas das argamassas</i>	22

4.2.2	<i>Confeção das argamassas e moldagem dos corpos de prova</i>	25
4.2.3	<i>Caracterização das argamassas no estado fresco</i>	28
4.2.4	<i>Caracterização das argamassas no estado endurecido</i>	30
4.2.5	<i>Forma de análise dos resultados – Análise estatística</i>	36
4.2.6	<i>Aplicação da técnica de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)</i>	38
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
5.1	CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS E DAS MATÉRIAS-PRIMAS DAS ARGAMASSAS.....	43
5.1.1	<i>Massa específica</i>	43
5.1.2	<i>Teor de orgânicos</i>	43
5.1.3	<i>Análise granulométrica</i>	44
5.1.4	<i>Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)</i>	48
5.1.5	<i>Difração de Raios X (DRX)</i>	52
5.2	CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO.....	54
5.2.1	<i>Índice de consistência</i>	54
5.3	CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO.....	56
5.3.1	<i>Densidade aparente</i>	56
5.3.2	<i>Absorção de água por imersão</i>	59
5.3.3	<i>Índice de vazios</i>	62
5.3.4	<i>Resistência à tração na flexão</i>	65
5.3.5	<i>Resistência à compressão</i>	68
5.3.6	<i>Massa específica seca</i>	72
5.3.7	<i>Massa específica saturada</i>	76
5.3.8	<i>Absorção de água por capilaridade</i>	79
5.4	AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) DE ARGAMASSAS COM RESÍDUOS DE BENEFICIAMENTO SECUNDÁRIO DE ROCHAS ORNAMENTAIS.....	83
5.4.1	<i>Análise do Inventário do Ciclo de Vida (ICV)</i>	83
5.4.2	<i>Avaliação dos Impactos do Ciclo de Vida (AICV)</i>	86
5.4.3	<i>Interpretação dos resultados</i>	89
6	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	92
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	95
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	96

1 INTRODUÇÃO

Resíduos sólidos, oriundos de diversas atividades, são vistos como grandes causadores de impactos ambientais e danos à saúde humana. No âmbito econômico, Henry Ford considera a geração de resíduos como perda de trabalho. Em 1926, ele começou a discutir o verdadeiro custo dos resíduos na indústria, dizendo que o trabalho do homem está embutido nos materiais e que por isso os materiais devem ser utilizados o máximo possível para que o trabalho não seja perdido (BAUTISTA-LAZO E SHORT, 2013). Em contrapartida, segundo Bautista-Lazo e Short (2013) os resíduos possuem potencial de geração de lucro, uma vez que podem ser reciclados, transformando-se em matéria prima para processos e produtos. Esse conceito de reinserção dos resíduos reciclados no ciclo produtivo, minimizando seus descartes e também o uso de recursos naturais, está atrelado ao modelo econômico chamado Economia Circular, o qual vem ganhando cada vez mais espaço nos dias de hoje (GEISSDOERFER; SAVAGET; BOCKEN; HULTINK, 2017).

As rochas ornamentais, materiais muito utilizados nas construções, por exemplo, são beneficiadas em processos que geram consideráveis volumes de resíduos. Primeiramente, os blocos de rochas ornamentais são extraídos nas jazidas e logo em seguida são destinados às indústrias para serem submetidos ao beneficiamento primário (onde os blocos são transformados em chapas) e ao beneficiamento secundário (onde as chapas são, basicamente, cortadas sob medida e polidas, transformando-se em peças acabadas) (VIDAL; AZEVEDO; CASTRO, 2014).

Atualmente, outra preocupação ambiental é a escassez e o uso desenfreado dos recursos naturais, pois, ao que tudo indica, em algum momento eles poderão ser esgotados. O setor da construção civil é um dos maiores consumidores desses recursos devido ao grande volume de produtos finais produzidos por ele diariamente (SANTOS; APOLINÁRIO; RIBEIRO, 2013).

Os agregados naturais, como a areia, estão entre os materiais mais consumidos, utilizados na confecção de argamassas e concretos, e, além de estarem correndo o risco de serem esgotados, os processos de extração e beneficiamento dos mesmos podem levar a diversos danos ambientais (SALES; SÁ; SANTOS, 2014). Assim, por constantemente necessitar de grandes quantidades de matérias-primas, a indústria da construção apresenta um notável potencial para a incorporação de resíduos sólidos em seus produtos (MÁRMOL;

BALLESTER; CERRO; MONRÓS; MORALES; SÁNCHEZ, 2010). Com isso, pode haver uma maior conservação dos recursos naturais e economia de energia, além da redução da disposição de resíduos em aterros (DÍAZ, 2013).

A argamassa pode ser considerada um dos materiais mais utilizados na construção civil. Ela é utilizada, desde os primórdios, para decoração, revestimento e enchimento de paredes, assentamento de alvenarias, base para pavimentos, etc. (ELSEN, 2006). Segundo Santos, Apolinário e Ribeiro (2013) os resíduos de beneficiamento de rochas ornamentais têm potencial para serem incorporados em argamassas, pois eles possuem alta estabilidade e resistência à abrasão. Até o momento, encontrou-se na literatura, trabalhos que avaliam somente o desempenho mecânico de argamassas com substituição parcial de areia por resíduos de beneficiamento secundário de rochas ornamentais, produzidos em marmorarias. Entretanto, de acordo com Bautista-Lazo e Short (2013) não basta reaproveitar os resíduos, para obter-se verdadeiras melhorias ambientais é necessário avaliar os processos de transformação dos resíduos em coprodutos, a fim de verificar se o uso dos mesmos é mais ambientalmente favorável do que o uso das matérias-primas virgens. Para isto, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) pode ser uma ferramenta eficaz, a partir da qual é possível analisar o desempenho ambiental de materiais que são produzidos com coprodutos.

Todo o contexto enunciado motivou a realização deste estudo, o qual avaliou a influência da substituição parcial (10%, 20% e 30%) da areia, em argamassas, por dois tipos de resíduos produzidos em uma marmoraria, resíduo de corte e resíduo de chapas brutas de rochas ornamentais, através de ensaios para caracterizar as matérias-primas da argamassa e os resíduos bem como as propriedades das argamassas confeccionadas. Nessa marmoraria, esses dois tipos de resíduos são produzidos em quantidades consideráveis, aproximadamente 17500 kg por semana, os quais são destinados a aterros de inertes.

Além disso, através da técnica de ACV, foi possível comparar os impactos ambientais potenciais da produção das argamassas com e sem resíduos, substituindo-se parcialmente a areia. Ademais, realizou-se também uma ACV de argamassas com substituição parcial do cimento por esses resíduos para fins comparativos.

Portanto, pode-se justificar este trabalho como uma forma alternativa de destinação para resíduos gerados em marmorarias por processos de beneficiamento secundário de rochas ornamentais, avaliando-se suas propriedades nas diversas possibilidades de incorporação dos mesmos em argamassas, a fim de se desenvolver um novo material de qualidade e com maior apelo ambiental.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar argamassas de traço 1:3 (cimento:areia) com substituição parcial da areia por resíduos de corte e polimento de chapas brutas de rochas ornamentais, a fim de se comprovar as seguintes hipóteses:

- Hipótese 1: a substituição do agregado natural (areia) pelos resíduos reduz os impactos ambientais potenciais associados à produção das argamassas;

- Hipótese 2: o desempenho físico-mecânico das argamassas não é prejudicado com essa substituição.

2.2 Objetivos específicos

- Através de ensaios físicos e mecânicos no estado fresco (índice de consistência) e no estado endurecido (densidade aparente, resistência à tração na flexão e à compressão, absorção de água por imersão e por capilaridade, índice de vazios, massa específica seca e saturada) verificar se houve mudanças significativas nas propriedades das argamassas devido à substituição da areia, em 10%, 20% e 30%, pelos resíduos;
- Estudar o Ciclo de Vida (ACV) da produção das argamassas com substituição da areia e também das argamassas com substituição do cimento pelos resíduos de corte e de polimento, a fim de comparar os impactos ambientais potenciais para cada substituição e desta forma identificar qual condição é mais ambientalmente favorável.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Rochas ornamentais

3.1.1 *Breve histórico do uso de rochas ornamentais*

As rochas ornamentais, que iniciaram suas formações há mais de 4 bilhões de anos, abrangem todos os tipos de materiais rochosos, os quais são extraídos e processados para diversos usos (VIDAL; AZEVEDO; CASTRO, 2014).

Em virtude de sua alta durabilidade, as rochas ornamentais são utilizadas para auxiliar na compreensão da evolução histórica e cultural da humanidade. Na Pré-História, essas rochas já eram empregadas em construções de casas, além de servirem como matérias-primas para utensílios e armas e até mesmo como cobertura para cadáveres. Na Idade Antiga, as rochas continuaram sendo utilizadas em casas bem como em templos, pirâmides e esculturas. Essa tendência permaneceu até a 1ª Revolução Industrial, quando as rochas passaram a ser menos inseridas nas edificações, visto que surgiram novos materiais: o metal e o concreto. Já na maioria da América, inclusive no Brasil, o início do uso de rochas ornamentais em construções foi mais tardio, no período colonial. Antes do emprego das rochas, as construções brasileiras eram feitas com madeira, folhas e galhos (VIDAL; AZEVEDO; CASTRO, 2014).

Atualmente, é comum o uso de rochas ornamentais em construções para fins estéticos e arquitetônicos, como revestimento de paredes, pisos, fachadas e balcões (MELLO; CHIODI FILHO; CHIODI, 2011). Na Europa, desde os primórdios até os dias atuais, essas rochas são empregadas também com função estrutural, como pode-se observar em renomadas obras, como a Catedral de Duomo, em Milão, e a Torre de Belém, em Lisboa (VIDAL; AZEVEDO; CASTRO, 2014).

O frequente emprego das rochas ornamentais até hoje, mesmo com o surgimento de novos materiais de construção, pode ser justificado pela durabilidade elevada e diversidade de cores e texturas, influenciadas pelas composições mineralógicas das muitas rochas presentes no mercado (VIDAL; AZEVEDO; CASTRO, 2014).

3.1.2 Obtenção das rochas ornamentais

Segundo Mello, Chiodi Filho e Chiodi (2011) as rochas ornamentais são divididas em: silicáticas (granitos e similares); carbonáticas (mármore, travertinos e calcários); silicosas (quartzos e similares); sílico-argilosas foliadas (ardósias) e ultramáficas (pedra sabão, pedra-talco e serpentinitos).

A cadeia produtiva dessas rochas engloba os processos de extração, beneficiamento primário e beneficiamento secundário (ou final), obtendo-se a rocha dimensionada, ou seja, a rocha beneficiada em formas e tamanhos específicos de acordo com a demanda (VIDAL; AZEVEDO; CASTRO, 2014).

Primeiramente, as rochas são extraídas nas pedreiras através de diversas tecnologias, sendo o corte com fio diamantado uma das mais utilizadas nos dias de hoje. Em seguida, os blocos extraídos são encaminhados para o beneficiamento primário, conhecido também por desdobramento ou serragem, feito a partir de teares (multilâmina, fio diamantado, etc.), nos quais eles são transformados em chapas brutas de rochas ornamentais. Por fim, essas chapas são submetidas ao beneficiamento secundário, processo realizado principalmente em marmorarias, que nada mais é do que a transformação dessas chapas em produtos finais (VIDAL; AZEVEDO; CASTRO, 2014).

Os principais processos realizados no beneficiamento secundário são: polimento e lustro, que diz respeito ao desgaste das rochas por abrasão para diminuir a rugosidade superficial, fechar os poros e dar brilho às chapas; corte, onde as chapas obtêm formas e dimensões específicas; acabamentos de bordas; flameamento, realizado com chama em altas temperaturas para fazer superfícies ásperas; apicoamento, feito com martelo pneumático para acabamentos específicos; jateamento, realizado a partir de uma bomba de pressão para limpeza da chapa serrada; furação, feita com máquinas de contorno, para produtos como pias (VIDAL; AZEVEDO; CASTRO, 2014).

3.1.3 Resíduos de beneficiamento secundário de rochas ornamentais

3.1.3.1 Geração e destinação dos resíduos

No Brasil, é muito comum o uso de rochas ornamentais como acabamento nos mais diversos tipos de construções: residenciais, comerciais, industriais, etc. Como já dito anteriormente, para a obtenção das peças personalizadas, chapas brutas de rochas

ornamentais passam por processos de beneficiamento secundário (ou final), onde são basicamente cortadas sob medida e polidas. Esses processos, são comumente realizados em marmorarias, espalhadas por todo o país. Estima-se que há cerca de 6.100 marmorarias no Brasil, sendo que a maior parte delas, aproximadamente 70%, está concentrada na região Sudeste, principalmente no Estado de São Paulo (CHIODI FILHO, 2018).

Durante as etapas de corte e polimento, no beneficiamento secundário das rochas ornamentais, são gerados resíduos em forma de lama, constituídos essencialmente por cacos e pó de pedra misturados em água, podendo ainda conter granalha de ferro, resinas, etc. (VIDAL; AZEVEDO; CASTRO, 2014). Esses processos causam uma série de impactos ambientais associados ao uso de materiais, água e energia e aos resíduos que são produzidos.

De acordo com Celik e Sabah (2008), as partículas finas dos resíduos de rochas ornamentais, após perderem toda umidade, podem se dispersar facilmente sob condições atmosféricas, como chuva e vento. Desta forma, quando os resíduos das marmorarias são dispostos em aterros sanitários e todo seu teor de água se evapora, o pó resultante pode poluir o ar e tornar-se prejudicial à saúde dos seres humanos, podendo causar doenças respiratórias como a silicose. A silicose é desenvolvida por inalação de sílica cristalina, em grandes quantidades e constantemente, condição a qual os trabalhadores no processo de extração das rochas ornamentais estão sujeitos, por exemplo, pois a sílica está presente na maioria dessas rochas (BON, 2006). Além disso, quando os resíduos de rochas ornamentais são descartados inadequadamente, devido à falta de fiscalização, podem promover ainda mais impactos, contaminando o solo e a água (GALETAKIS; SOULTANA, 2016).

3.1.3.2 Reciclagem dos resíduos

Devido aos diversos danos ambientais que os resíduos de rochas ornamentais podem causar, a reciclagem dos mesmos torna-se uma opção mais sustentável. Ela pode trazer muitos benefícios, não só ao meio ambiente, ao contribuir para a redução do volume de resíduos, mas também às indústrias, que podem ganhar novas matérias-primas, reduzindo o consumo de recursos naturais (CELIK E SABAH, 2008). Há ainda, a possibilidade de geração de empregos, visto que para transformar os resíduos em matérias-primas é necessário que haja mão de obra (SILVEIRA; CARMO; DE PAULA; DA PURIFICAÇÃO; DA HORA; OLIVEIRA, 2017).

De acordo com Galetakis e Soultana (2016), Rana, Kalla, Verma e Mohnot (2016), Singh, Anshuman e Dipendu (2017) e Vardhan, Goyal, Siddique e Singh (2015) resíduos de rochas ornamentais são materiais inertes. Além disso, segundo Mota, Oliveira, Trajano, Santiago e Silva (2012) esses tipos de resíduos não são tóxicos e nem biodegradáveis. Assim, eles podem ser classificados como Classe II B, classe dos resíduos da construção civil e materiais afins, de acordo com a classificação dos resíduos sólidos da norma NBR 10004 (ABNT, 2004). Dessa forma, eles não são considerados resíduos perigosos, ou seja, não são inflamáveis, reativos, corrosivos, tóxicos e nem patogênicos. Portanto, esses resíduos podem ser reciclados para serem utilizados como matérias-primas em materiais de construção.

3.2 Argamassas

3.2.1 Contexto histórico

Argamassas são utilizadas desde a Antiguidade, com uma ampla gama de composições e finalidades, como revestimento interno e externo de construções, assentamento de alvenarias, enchimento de paredes, base para pavimentos, etc., dependendo do período histórico e da localização geográfica de cada região (ELSEN, 2006).

As primeiras evidências sobre o uso de argamassas foram encontradas na região da Mesopotâmia, na Idade Antiga. Nessa região, as construções eram feitas de tijolos de barro e rochas, assentados com argamassas confeccionadas com solo barroso, que auxiliava na boa trabalhabilidade, misturado à argila e calcário, empregados como aglomerantes. Mais tarde, os egípcios começaram a confeccionar argamassas de barro misturado ao gesso para assentar as pedras e revestir as paredes de suas famosas pirâmides (CARVALHO, 2010). Com o passar do tempo, esses aglomerantes tradicionais da época, gesso, cal e argila, foram sendo substituídos por cimentos naturais e artificiais em argamassas (ELSEN, 2006).

Os primeiros cimentos surgiram durante a Antiguidade Clássica. A princípio, os romanos criaram uma argamassa feita de cal com *Opus Caementicium*, cinza pozolânica que, ao ser incorporada à argamassa, apresentava características similares às do cimento utilizado atualmente, formando um material impermeável, diferente das argamassas feitas anteriormente. Essas novas argamassas fizeram-se presentes em grandes obras arquitetônicas como o Coliseu, o Pantheon e as Termas de Diocleciano (CARVALHO, 2010).

No final do século XVIII já haviam sido criados vários tipos de cimentos naturais, e, posteriormente, em 1824, Joseph Aspdin inventou o cimento artificial Portland (CARVALHO, 2010). Empreiteiros ingleses compararam esse cimento com os outros cimentos existentes e perceberam que ele apresentou um desempenho superior. Desde então, o cimento Portland passou a ser muito utilizado, o que acontece até hoje, sendo considerado o principal aglomerante de argamassas e concretos (ELSEN, 2006).

3.2.2 Definições

A NBR 13281 (ABNT, 2005) define argamassa como uma mistura homogênea de aglomerante(s) inorgânico(s), agregado(s) miúdo(s) e água, incluindo ou não aditivos, sendo industrializada ou dosada em obras.

Segundo consta na norma NBR 9935 (ABNT, 2011), agregado pode ser definido como material granular, natural ou artificial, reciclado ou não, que possui dimensões e propriedades ideais para ser utilizado na confecção de concretos e argamassas. Dentre os agregados utilizados estão: areia, brita, cascalho, pedregulho, rejeitos industriais reciclados, etc. A areia é um agregado miúdo muito empregado em argamassas, podendo ser obtida através de processos artificiais ou naturais referentes à desintegração de rochas ou ainda por processos industriais.

Já o aglomerante é definido pela norma NBR 11172 (ABNT, 1990) como material pulverulento que, ao entrar em contato com a água, forma uma pasta com propriedades aglutinantes. O cimento Portland é um dos principais aglomerantes usados em argamassas e concretos. De acordo com a NBR 16697 (ABNT, 2018), ele é um aglomerante do tipo hidráulico, ou seja, que endurece ao reagir com água e que, depois de endurecido, torna-se resistente à ação da mesma. Ele é feito com clínquer Portland moído, material obtido a partir da queima de argilas e calcários, misturado a sulfato de cálcio e minerais. Existem diversos tipos de cimentos Portland, empregados em finalidades distintas: cimento Portland comum, composto, de alto forno, pozolânico, de alta resistência inicial, estrutural, não estrutural, etc. (ABNT, 2018).

As argamassas podem ser denominadas de várias formas, de acordo com a NBR 13529 (ABNT, 2013), em relação a(o): natureza, tipo e número de aglomerantes (aérea, hidráulica, de cimento, de cal, de gesso, de cimento e cal, mista, simples); propriedades (de revestimento, comum, aditivada, colante, para rejuntamento, de proteção radiológica, hidrófuga, de impermeabilização, termo isolante, refratária, acústica); condições de

fornecimento e preparo (dosada em central, preparada em obra, industrializada, mistura semipronta).

Para cada finalidade da argamassa utiliza-se um traço distinto, que representa a quantidade de cada um dos materiais a serem utilizados, seguindo uma proporção em massa ou volume. O traço, os tipos de agregados e aglomerantes bem como a quantidade de água influenciam nas propriedades das argamassas. Essas propriedades são avaliadas tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. A norma NBR 13281 (ABNT, 2005) apresenta requisitos, baseados em ensaios, para que argamassas de assentamento e revestimento de paredes e tetos possam ser utilizadas com segurança e qualidade em construções.

3.3 Uso de resíduos de beneficiamento de rochas ornamentais em argamassas

Recentemente, é possível encontrar vários trabalhos sobre o uso de resíduos de rochas ornamentais como matérias-primas para argamassas. De uma maneira geral, a maioria dos trabalhos encontrados são relacionados à incorporação de resíduos de extração e serragem de rochas ornamentais, não utilizando-se os resíduos de beneficiamento secundário advindos das marmorarias. Além disso, não há muitos trabalhos sobre a incorporação desses resíduos em argamassas, sendo a maior parte deles incorporada em concretos, em substituição parcial ao cimento. Foi observado, ainda, que em diversos trabalhos, não está claro de qual etapa do beneficiamento (primário ou secundário) o resíduo foi retirado para ser utilizado nos testes laboratoriais. A seguir, serão descritos os resultados de alguns trabalhos encontrados, nos quais os resíduos de rochas ornamentais substituíram parcialmente a areia, em argamassas.

Sales, Sá e Santos (2014) utilizaram pó de mármore como substituto da areia fina em argamassas, em teores de 20% e 40%. As argamassas foram produzidas em dois traços distintos, 1:1:6 e 1:2:9 (cimento:cal:areia), em volume. Após os testes, os autores concluíram que as resistências à compressão e à tração na flexão das argamassas aumentaram somente com a incorporação de 20% de resíduo no traço 1:1:6. Os outros corpos de prova apresentaram resistência mecânica um pouco menor que a do corpo de prova sem resíduos. Além disso, a substituição de 20% de areia por resíduo, em ambos os traços, resultou nos menores valores de absorção e de índice de vazios. Por outro lado, os corpos de prova com substituição de 40% obtiveram os maiores valores de absorção e índice de vazios.

Keleştemur, Arıcı, Yıldız e Gökçer (2014) também fizeram a troca parcial da areia fina por pó de mármore, obtidos nos processos de beneficiamento primário e secundário, em porcentagens de 20%, 40% e 50%, em volume, juntamente com fibras de vidro (0,25 kg/m³, 0,50 kg/m³ e 0,75 kg/m³), em argamassas. Entretanto, após a confecção, alguns corpos de prova foram expostos a altas temperaturas, de 400 a 800°C, durante uma hora. Os resultados dos testes feitos nos corpos de prova que não foram inseridos no forno apontaram que quanto maior a quantidade de resíduos incorporados à argamassa, maior a resistência à compressão e menor a porosidade. Em contrapartida, os corpos de prova que foram submetidos a temperaturas elevadas tiveram redução na resistência à compressão e aumento de porosidade, resultando em mudanças morfológicas e microfissuras.

Lampreia e Veiga (2014) substituíram a areia por lama de mármore e calcário, em teores mais baixos, 5%, 10%, 15% e 20% (em massa), em argamassas com traço de 1:4 (cimento:areia), e somente 20% em argamassas com traços de 1:5 e 1:6. Aos 28 dias de cura, para o traço 1:4 foi constatado que quanto maior a quantidade de resíduos incorporados, maior a densidade aparente e a resistência mecânica das argamassas, tendo os menores valores as argamassas sem resíduos. Nos traços de 1:5 e 1:6, a resistência mecânica e a densidade aparente com resíduos também apresentaram valores maiores do que as argamassas sem resíduos. Em geral, os melhores resultados foram das argamassas produzidas no traço de 1:4 com 20% de resíduos.

Corinaldesi, Moriconi, e Naik (2010) substituíram a areia e também o cimento, separadamente, por pó de mármore obtido das etapas de serragem e beneficiamento secundário, em um único teor, 10%, em argamassas de traço 1:3 (cimento, areia), em volume. Aos 28 dias de cura, com a adição de resíduos, em substituição à areia nas argamassas, houve uma pequena redução de 10% da resistência à compressão em relação à argamassa sem resíduos, sendo que, na substituição do cimento, essa redução foi ainda maior, 20%.

Moura, Gonçalves e Leite (2002) optaram por fazer a substituição da areia por resíduo de serragem de mármore e granito, somente em teores de 5% e 10%, em argamassas com traço de 1:6 (cimento:areia), em massa, resultando em um aumento de resistência mecânica em relação à argamassa sem resíduos, sendo a argamassa com 10% de resíduos a de melhor resistência.

Assim, observa-se na literatura que, de uma forma geral, os resíduos de rochas ornamentais não alteraram significativamente as propriedades das argamassas. Além disso, foi visto que esses resíduos podem até melhorar algumas propriedades das argamassas,

dependendo dos teores incorporados e dos traços utilizados, como no caso dos traços 1:5 e 1:6 (cimento:areia).

3.4 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) como ferramenta para análise de desempenho ambiental de materiais na construção civil

Segundo Curran (2013), a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta utilizada para indicar os impactos ambientais potenciais de produtos, processos e atividades humanas.

A Resolução CONAMA nº 001 de 23 de setembro de 1986 (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 1986) define impacto ambiental como qualquer modificação nas propriedades biológicas, físicas e químicas do meio ambiente, sendo provocada por matéria ou energia provenientes de atividades antrópicas, afetando, de forma direta ou indireta: a biota; as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente; a qualidade dos recursos ambientais; a saúde, o bem-estar e a segurança da população e as atividades sociais e econômicas.

Em uma ACV podem ser levados em consideração os impactos desde a aquisição de matérias-primas, até a produção, o uso e a gestão de resíduos que venham a ser gerados. Frequentemente, é possível observar o uso dessa técnica para avaliar o desempenho ambiental de materiais de construção produzidos com diversos tipos de resíduos e identificar melhorias ambientais associadas à produção desses materiais.

A argamassa é um dos materiais de construção mais utilizados e para confeccioná-las, geralmente, há um consumo de grandes quantidades de cimento e agregados naturais, como a areia. Assim, o setor da construção civil é considerado o maior consumidor de cimento, representando quase 67% da demanda (SINGH; CHOUDHARY; SRIVASTAVA; SANGWAN; BHUNIA, 2017).

O cimento é um dos principais contribuintes para os elevados valores de impactos ambientais associados à produção de argamassas. De acordo com Singh, Choudhary, Srivastava, Sangwan e Bhunia (2017), a fabricação do cimento é responsável por aproximadamente 5% do total das emissões atmosféricas mundiais de dióxido de carbono (CO₂), causador de preocupantes impactos ambientais como o aquecimento global e a acidificação. Além do CO₂, outras emissões estão relacionadas ao processo produtivo do cimento, principalmente na etapa de produção do clínquer, podendo causar danos à saúde

humana e ao meio ambiente: material particulado, NO_x , SO_x , orgânicos tóxicos, dioxinas e furanos e metais pesados. Durante a produção do clínquer há, ainda, um alto consumo de combustíveis, principalmente fósseis, contribuindo para a depleção dos mesmos (MAURY; BLUMENSCHHEIN, 2012).

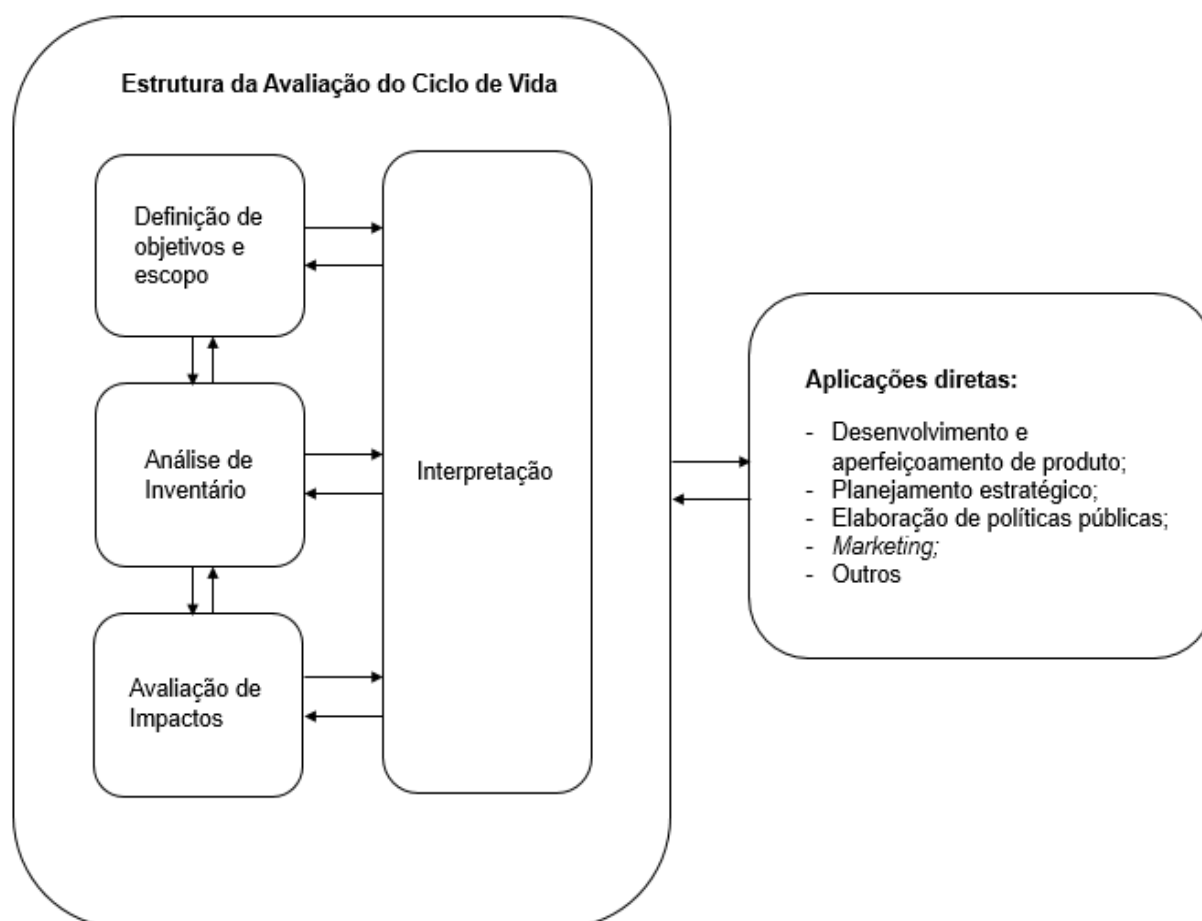
A extração de areia em grandes quantidades também provoca impactos ao meio ambiente, os quais podem relacionar-se à erosão de solos e leitos de rios, além da depleção desse recurso natural (SINGH; CHOUDHARY; SRIVASTAVA; SANGWAN; BHUNIA, 2017). Além disso, assim como o cimento, a sua cadeia produtiva (extração, beneficiamento, armazenagem e transporte) também é responsável pela emissão de CO_2 , NO_x , SO_x , material particulado, além de CO e CH_4 . O uso de óleo diesel na etapa de extração, nos equipamentos utilizados para a dragagem, e também nos caminhões de transporte da areia extraída, pode causar toxicidade aos seres humanos. Ademais, pode ocorrer vazamento de óleo diesel advindo das dragas, podendo contaminar os cursos d'água (SOUZA, 2012).

Como já mencionado anteriormente, há vários trabalhos sobre o uso de resíduos de rochas ornamentais como matérias-primas para concreto e argamassas. Grande parte dos impactos ambientais referentes à produção dessas rochas estão vinculados aos seus resíduos. No Brasil, a Política Nacional de Resíduos Sólidos foi instaurada em 2010 para, dentre outras finalidades, orientar a destinação final adequada dos resíduos, como forma de proteção à saúde pública e ao meio ambiente (BRASIL, 2010). Entretanto, a ausência de fiscalização facilita o descarte inadequado de diversos tipos de resíduos, como os resíduos de rochas ornamentais que podem causar impactos ambientais devido à contaminação de lagos, rios e solos e à poluição do ar (GALETAKIS; SOULTANA, 2016). Desta forma, o presente trabalho propôs que fosse realizada uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) de argamassas com substituição parcial de areia por resíduos de beneficiamento secundário de rochas ornamentais, com intuito de avaliar o desempenho ambiental dessas argamassas ao se evitar impactos associados à parcela de areia substituída, e ao mesmo tempo, contabilizar os impactos referentes às porcentagens de resíduos utilizadas.

3.4.1 Detalhamento das etapas do ciclo de vida

De acordo com as normas ISO 14040 (ABNT, 2014a) e ISO 14044 (ABNT, 2014b), uma ACV contempla as seguintes fases apresentadas na Figura 1: definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impacto e interpretação.

Figura 1: Etapas de uma ACV



Fonte: ABNT, 2014a

3.4.1.1 Definição de objetivo e escopo

O primeiro passo para se realizar uma ACV é definir os objetivos e o escopo, sendo este último representado pelo sistema de produto e suas fronteiras, unidade funcional, fluxo de referência, procedimentos de alocação (se houver), limitações do estudo, dentre outros (ABNT, 2014a).

Um sistema de produto exerce uma ou mais funções e é formado por processos elementares que possuem fluxos de entrada e saída (matéria e/ou energia), e são conectados entre si por fluxos intermediários. Cada sistema de produto é delimitado por fronteiras que indicam as etapas do ciclo de vida a serem consideradas na ACV, dependendo do objetivo e limitações de cada estudo (SILVA, 2012). De acordo com European Commission (2010) o sistema de produto pode ser classificado como:

- *Cradle-to-gate* (do berço ao portão da fábrica): sistema que abrange as etapas de extração e beneficiamento das matérias-primas e fabricação dos produtos;
- *Cradle-to-grave* (do berço ao túmulo): abrange todas as etapas do ciclo de vida, desde a obtenção das matérias-primas até o uso e fim de vida dos produtos;
- *Gate-to-gate* (do portão ao portão da fábrica): abrange apenas a manufatura dos produtos;
- *Gate-to-grave* (do portão da fábrica ao túmulo): abrange as fases de distribuição, uso e fim de vida dos produtos.

A unidade funcional representa a quantificação das funções do sistema de produto, ou seja, delimita-se as funções a certas quantidades, servindo assim, de referência para quantificar também as entradas e saídas. Logo após, define-se também o fluxo de referência, que nada mais é do que a devida quantia de produto para se realizar as funções, já quantificadas pela unidade funcional (ABNT, 2014a, 2014b).

De acordo com a norma ISO 14044 (ABNT, 2014b), em um sistema que implica em reciclagem ou em múltiplas funções, produtos e coprodutos (resíduos a serem utilizados como matéria-prima em algum ciclo produtivo), quando a alocação não puder ser evitada, é conveniente que a faça por meio da subdivisão das entradas e saídas entre os diferentes produtos de um sistema. Assim, há uma repartição das cargas (impactos) ambientais entre os produtos e os coprodutos, por meio de relações físicas, econômicas, etc. Para Saaed (2017), ao transferir parte dos impactos para o sistema que utilizará os coprodutos, não leva-se em conta os ganhos relacionados a reciclagem dos coprodutos para substituírem matérias-primas virgens escassas e nem os impactos evitados relacionados à disposição final dos coprodutos. Entretanto, os métodos de subdivisão e expansão do sistema para se evitar a alocação são pouco utilizados, possivelmente, pela dificuldade que há em colocá-los em prática. A subdivisão implica em dividir o processo multifuncional e subprocessos e a expansão do sistema sugere mudanças nas fronteiras e na unidade funcional, podendo comprometer o objetivo e o escopo definidos no início. Ademais, Chen, Habert, Bouzidi, Jullien e Ventura (2010) afirmam que não há comprovação de que o método de alocação é melhor que os outros.

Segundo Silva (2012), os estudos de ACV podem, ainda, apresentar limitações, tais como, carência de métodos nacionais de avaliação e dados escassos ou falta de acesso à eles. Essas limitações também devem ser relatadas nos estudos.

3.4.1.2 Análise do inventário

Depois de definir o objetivo e o escopo, o próximo passo é elaborar o Inventário do Ciclo de Vida (ICV). Para isto, primeiramente é necessário fazer a coleta de dados nos próprios locais de produção ou retirá-los de outras fontes (ABNT, 2014b). Posteriormente, faz-se os cálculos com os dados, gera-se o inventário e realiza-se a análise do mesmo (SILVA, 2012).

3.4.1.3 Avaliação dos impactos ambientais do ciclo de vida (AICV)

A partir dos resultados do ICV realiza-se a AICV, a fim de avaliar a magnitude dos impactos ambientais potenciais associados ao sistema de produto. Geralmente, durante esta etapa, os dados do inventário são correlacionados com categorias e indicadores de impactos ambientais (ABNT, 2014a). Atualmente existem diversos métodos de AICV e categorias de impactos ambientais, disponíveis nos softwares de modelagem de ACV (MENDES; BUENO; OMETTO, 2016).

Dentre os métodos de AICV mundialmente mais utilizados estão: CML, Eco-indicador 99, Ecological Scarcity, EDIP, EPS 2000, Impact 2000+, LIME, LUCAS, MEEuP, ReCiPe, TRACI e IMPACT World+. Apesar desses métodos terem sido criados em países da Europa e América do Norte, parte de suas análises oferece abrangência de aplicação global. Dentre os métodos citados, o CML, com abordagem *midpoint* (danos intermediários), é o que apresenta a maior quantidade de categoriais de impacto com abrangência global. Ele foi desenvolvido na Holanda e possui modelos de caracterização escolhidos a partir de uma profunda revisão das metodologias presentes em todo o mundo. Assim, devido à sua abrangência global ele é um dos métodos indicados para se utilizar em estudos brasileiros, uma vez que ainda não há um método que considere as particularidades do Brasil (MENDES; BUENO; OMETTO, 2016).

Cada método de AICV dispõe de uma série de categorias de impactos a serem avaliados (PASSUELLO; OLIVEIRA; COSTA; KIRCHHEIM, 2014). As categoriais mais presentes nos métodos citados acima são: mudanças climáticas, acidificação, toxicidade humana, depleção de recursos abióticos (fóssil e não fóssil), ecotoxicidade terrestre e aquática, oxidação fotoquímica, depleção da camada de ozônio e uso da terra (MENDES; BUENO; OMETTO, 2016). Todas essas categorias são indicadas para estudos relacionados à construção civil (PASSUELLO; OLIVEIRA; COSTA; KIRCHHEIM, 2014; SOARES;

SOUZA; PEREIRA, 2006). Os impactos avaliados podem causar graves danos ao meio ambiente e à saúde humana e, por isso, estudá-los torna-se importante. A escolha de quais métodos e categoriais serão utilizados relaciona-se à adequação aos elementos definidos no objetivo e escopo.

3.4.1.4 Interpretação dos resultados

A etapa final de uma ACV é a Interpretação dos resultados, feita com base na AICV, avaliando-se a completeza do estudo, as limitações, as recomendações e realizando-se as devidas conclusões (ABNT, 2014b).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais empregados na confecção das argamassas

4.1.1 Resíduos

Os resíduos de beneficiamento secundário de rochas ornamentais são produzidos, em forma de lama, principalmente durante as etapas de corte e polimento das chapas brutas, e são constituídos por proporções não definidas de vários tipos de rochas. Por isso, conforme o lote em estudo poderá haver variação da composição química dos resíduos, o que é comum de acontecer em pesquisas feitas com resíduos industriais. A Figura 2 mostra a variedade de rochas ornamentais que são beneficiadas na marmoraria onde os resíduos foram coletados e na Figura 3 pode-se observá-las em forma de chapas cruas (brutas), advindas de indústrias de beneficiamento primário, antes de serem submetidas ao beneficiamento final.

Figura 2: Mármore, granitos e quartzitos beneficiados na marmoraria onde os resíduos foram coletados



Fonte: a autora

Figura 3: Chapas brutas de rochas ornamentais vindas de indústrias de extração e serragem



Fonte: a autora

Para este estudo foram coletados, em uma marmoraria na cidade de Sorocaba-SP, dois tipos de resíduos: resíduo gerado pelo corte de chapas brutas de rochas ornamentais, denominado aqui neste trabalho como resíduo de corte (R1), e resíduo gerado a partir do polimento e outros acabamentos específicos (apicoamento, furação, colagem de peças) de chapas brutas de rochas ornamentais, denominado aqui neste trabalho como resíduo de polimento (R2).

Nesta marmoraria, primeiramente as chapas brutas de rochas, principalmente, granitos, mármore e quartzitos, são cortadas, conforme demanda, em uma serra-ponte COCH C34MAX, Siemens, com disco diamantado Gozilla. Esse corte é realizado para deixar as chapas com dimensões mais próximas às dos produtos finais, que pode ser desde bancadas e pias até soleiras e peitoris. A serra pode ser vista na Figura 4. Esse procedimento gera o resíduo de corte (R1), composto por cacos e pó de rochas misturados à água que sai da serra, utilizada para refrigerar os equipamentos e remover o pó gerado durante o processo de corte. Esse resíduo em forma de lama é depositado em canaletas dentro da própria marmoraria e, de acordo com a mesma, depois é transferido para caçambas, as quais são destinadas a aterros de inertes.

Figura 4: Serra-ponte cortando uma chapa bruta de rocha ornamental



Fonte: a autora

Depois do corte das chapas, elas seguem para a etapa de polimento e outros acabamentos específicos, que depende do tipo de produto a ser confeccionado, onde são polidas com resinas em politrizes, cortadas por máquinas de cortes e coladas, quando houver necessidade. Essa etapa gera o resíduo de polimento (R2), composto por cacos e pó de pedra misturados à água, resinas, colas e outros tipos de resíduos. Os equipamentos utilizados podem ser vistos na Figura 5. Esse resíduo também é encaminhado a aterros de inertes.

Figura 5: Politriz e máquina de corte para acabamentos específicos, utilizadas na marmoraria em estudo



Fonte: a autora

Os dois tipos de resíduos foram obtidos em forma de lama e por isso foram secos em estufa Quimis, modelo Q317M, a 50°C durante 72h. A Figura 6 apresenta os resíduos R1 e R2 armazenados após a coleta na marmoraria, antes da secagem. Nota-se que o resíduo R1 possui mais água misturada a ele devido ao lançamento de água, pela serra-ponte, nas chapas de rochas durante o procedimento de corte.

Figura 6: Resíduos de corte (R1) (esq.) e de polimento (R2) (dir.) coletados em forma de lama



Fonte: a autora

Na sequência, os resíduos foram moídos manualmente em almofariz para serem transformados em pó. Depois disso, eles foram peneirados com uma peneira própria para areia (abertura de 2,79mm), utilizada na construção civil, para a retirada de cacos de rochas e outras impurezas misturadas a eles (tampas de resinas, fios de lã, plásticos, etc.). A Figura 7 apresenta os dois tipos de resíduos secos e moídos, armazenados para ensaios. Percebe-se que existe uma pequena diferença de cor entre eles, sendo o R1 mais acinzentado e o R2 um pouco mais claro e com um leve tom amarronzado. Essa diferença de cor pode ter ocorrido devido à mistura, no R2, de resinas e outros produtos utilizados durante o processo de polimento das chapas de rochas ornamentais.

Figura 7: Resíduo de corte (esq.) e resíduo de polimento (dir.) armazenados para ensaios



Fonte: a autora

4.1.2 Aglomerante

O aglomerante utilizado neste trabalho foi o Cimento Portland CII-Z-32, da marca Votoran, indicado para todos os tipos de obras, fabricado pelo grupo Votorantim Cimentos e obtido em lojas de materiais de construção na cidade de Sorocaba-SP. Esse tipo de cimento é fabricado e frequentemente utilizado em obras da região de Sorocaba, o que justifica seu emprego neste trabalho.

O cimento CII-Z-32 é produzido de acordo com a NBR 11578 (ABNT, 1991) e sua categoria Z engloba os cimentos Portland compostos com polozana, material silicoso ou silicoaluminoso que, na presença de água e quando é finamente dividido, reage com hidróxido de cálcio para obter propriedades cimentícias (ABNT, 2014).

4.1.3 Agregado

O agregado utilizado na confecção das argamassas foi uma areia de pedreira de granulometria média (ABNT, 2005), produzida pelo Grupo Julio & Julio e que também foi adquirida em lojas de materiais de construção em Sorocaba, SP.

4.1.4 Água

A água potável proveniente da rede de distribuição da cidade de Sorocaba, tratada pelo Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAAE), foi a empregada na confecção dos corpos

de prova. Essa água atende aos requisitos de qualidade da legislação quanto aos seus constituintes.

4.2 Métodos

4.2.1 Caracterização dos resíduos e das matérias-primas das argamassas

A caracterização das matérias-primas das argamassas e dos resíduos R1 e R2 foi realizada a fim de comparar esses materiais, identificando diferenças que poderiam influenciar no desempenho físico-mecânico das argamassas ao substituir parcialmente a areia e o cimento pelos resíduos.

4.2.1.1 Massa específica

O ensaio para a determinação da massa específica das matérias-primas utilizadas foi realizado a partir do método do picnômetro descrito por Caputo (1988). Os testes foram feitos somente com amostras de areia e resíduos de corte e polimento, visto que as massas específicas dos outros materiais (cimento e água) foram dadas pelos fornecedores. Inicialmente, na sala com temperatura estabilizada a 23°C, em uma balança analítica Shimadzu de precisão $\pm 0,0001$ g, modelo AUX220, um picnômetro de volume v_l 50ml da marca TecLabor, sem o termômetro, foi pesado, obtendo-se uma massa chamada de m_o . Então, uma amostra com massa m_s de aproximadamente 1g foi inserida no picnômetro e em seguida, inseriu-se também água destilada até que ele ficasse totalmente preenchido, e mais uma vez foi pesado, obtendo-se uma massa m_{sl} . O picnômetro foi lavado e depois foi pesado somente com água destilada dentro, obtendo-se uma massa m_l . Esse procedimento foi repetido três vezes para cada tipo de resíduo e também para a areia.

Após a determinação das massas foi possível calcular a massa específica da água destilada (ρ_l) e também a massa específica de cada amostra (ρ_p) a partir das equações 1 e 2 (CAPUTO, 1988).

$$\rho_l = \frac{m_l - m_o}{v_l} \quad (\text{eq. 1})$$

$$\rho_p = \frac{\rho_l \cdot m_s}{m_s + m_l - m_{sl}} \quad (\text{eq. 2})$$

4.2.1.2 Teor de orgânicos

O teor de orgânicos presente nos dois tipos de resíduos utilizados neste trabalho foi determinado seguindo-se a norma ASTM D3171 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2015). Para isso, três cadinhos lavados foram colocados, a 500°C por 20 min, em uma mufla da marca Quimis, modelo Q318M24, para secarem completamente. Depois, foram removidos da mufla e dispostos em um dessecador por cerca de 20min até esfriarem.

Feito isso, os cadinhos foram pesados em uma balança de precisão $\pm 0,0001\text{g}$ da marca Shimadzu, modelo AUX220, obtendo-se uma massa conhecida como M_c . Então, aproximadamente 1g de um dos tipos de resíduo foi inserido em cada cadinho e na sequência os cadinhos com os resíduos foram novamente pesados, obtendo-se três massas M_0 distintas. Logo após a pesagem, os três cadinhos com resíduos voltaram para dentro da mufla a 565°C por mais 2 horas e 30 minutos. Em seguida, os três cadinhos com resíduos foram retirados da mufla e colocados no dessecador por mais 20 min para serem, mais uma vez, resfriados e posteriormente pesados, obtendo-se três massas diferentes M_1 – 1ª Medição. Feito isso, os cadinhos foram inseridos de novo no forno a 565°C por mais 1 hora, depois foram retirados, resfriados em dessecador por cerca de 20min e pesados, obtendo-se outras três massas distintas denominadas M_2 – 2ª medição. Por fim, os cadinhos voltaram para a mufla com a mesma temperatura até completar 40 min, quando novamente foram retirados, inseridos no dessecador por mais 20min e pesados obtendo-se três novas massas chamadas de M_3 – 3ª Medição. Assim, com essas medidas, foi possível fazer o cálculo do teor de inorgânicos (T_i) de cada tipo de resíduo através da equação 3.

$$T_i (\%) = \left[\frac{(M_3 - M_c)}{M_0 - M_c} \right] * 100 \text{ (eq. 3)}$$

O teor de componentes orgânicos de cada resíduo, queimado na mufla devido às altas temperaturas, pode ser obtido a partir da equação 4.

$$T_o (\%) = 100 - T_i \text{ (eq. 4)}$$

4.2.1.3 Análise granulométrica por peneiramento

Tanto o cimento quanto os resíduos foram submetidos a análises granulométricas realizadas no Laboratório de Água e Solos da UNESP de Sorocaba, SP. A análise granulométrica da areia foi fornecida pelo laboratório onde os corpos de prova foram confeccionados. Essa análise foi repetida apenas para fins comparativos com os outros materiais. Para este ensaio foram utilizados 200g de cada amostra (R1, R2, cimento e areia). Depois, cada amostra pesada foi inserida, separadamente, no topo de um conjunto de 4 peneiras empilhadas em ordem crescente de abertura de malha, sendo a menor abertura de 0,600mm na base e a maior abertura de 4,75mm no topo. Além disso, embaixo da peneira de menor abertura foi colocado um fundo. Então, esse conjunto de peneiras com o fundo foi encaixado em um agitador da marca Solotest, e ligado por 5 minutos em uma frequência de 6 Hz. Após o término, o que restou no fundo foi transferido para outro conjunto de 4 peneiras com aberturas menores, sendo a menor abertura de 75 μ m e a maior abertura de 0,425 mm. Esse conjunto também foi inserido no agitador com a mesma frequência e pelo mesmo tempo. É importante ressaltar que as 8 peneiras não foram inseridas juntas no agitador, pois não havia espaço para todas. A Tabela 1 apresenta a sequência das peneiras de cada conjunto e suas aberturas.

Tabela 1: Sequências das peneiras no agitador

	Conjunto de peneiras 1	Conjunto de peneiras 2
	Inicial: 200g de amostra	Inicial: Fundo 1
Abertura (mm)	4,750 (4 mesh)	0,425 (40 mesh)
	2,360 (8 mesh)	0,300 (50 mesh)
	1,180 (16 mesh)	0,150 (100 mesh)
	0,600 (30 mesh)	0,075 (200 mesh)
	Fundo 1	Fundo 2

Fonte: a autora

Por fim, foi feita a pesagem das partículas retidas em cada peneira e no fundo, e assim, foi possível calcular a porcentagem de retenção em cada uma delas, dividindo o peso retido em cada peneira pelo peso original da amostra (ABNT, 2003). Além disso, foi realizada também uma comparação com os limites ótimos e utilizáveis apresentados nas

normas NBR 7211 (ABNT, 2009) e NBR 7214 (ABNT, 2015).

4.2.1.4 Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Raios X por Dispersão em Energia (EDS)

Para a determinação da morfologia das partículas constituintes dos resíduos e da areia e também para a avaliação da composição química elementar, foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura do Laboratório Multiusuário de Caracterização de Materiais (LMCMat) da UNESP de Sorocaba, SP. A preparação das amostras, para essa análise, foi obtida depositando o material a ser analisado em fitas de carbono que, por sua vez, foram recobertas com fino filme de ouro e paládio em um metalizador Denton Vacuum Desk V. As fitas de carbono contendo as amostras foram transferidas para o porta-amostras do Microscópio Eletrônico de Varredura da marca Jeol, modelo JSM-6010LA, para análise. Este microscópio conta com uma unidade de Espectroscopia de Raios X por Dispersão em Energia (EDS) acoplada, que permite obter-se a composição química elementar de forma semi-quantitativa em regiões selecionadas nas amostras.

4.2.1.5 Difração de Raios X (DRX)

A caracterização mineralógica dos resíduos de corte (R1) e polimento (R2) de chapas brutas de rochas ornamentais foi realizada através da técnica qualitativa e não-destrutiva, Difração de Raios X (DRX), muito utilizada para análises de compostos cristalinos. Nessa técnica, raios X são emitidos em amostras e, ao interagir com os átomos das amostras, sofrem espalhamento, resultando em feixes difratados. Esses feixes são difratados em diferentes ângulos de incidência, representando estruturas cristalinas distintas (TOLEDO, 2003).

Para este ensaio foi utilizado o Difratometro de Raios X (DRX) Panalytical X'Pert Powder do Laboratório Multiusuário de Caracterização de Materiais (LMCMat) da UNESP de Sorocaba, SP.

4.2.2 Confeção das argamassas e moldagem dos corpos de prova

Para este estudo utilizou-se o traço 1:3 (cimento:areia), em massa. Foram produzidas argamassas sem resíduos e com substituição da areia, em teores de 10%, 20% e 30%, por

resíduo de corte (R1) e resíduo de polimento (R2), separadamente. A Tabela 2 apresenta as proporções, em massa, das matérias-primas empregadas em cada uma das argamassas.

Tabela 2: Proporções de matérias-primas nas misturas das argamassas

Nomenclatura	Resíduo de Corte (kg)	Resíduo de Polimento (kg)	Areia (kg)	Cimento (kg)	Água (kg)	Água/Cimento (%)
Sem resíduos	0	0	2,42	0,81	0,7	0,86
R1_10%	0,24	0	2,18	0,81	0,7	0,86
R1_20%	0,48	0	1,94	0,81	0,7	0,86
R1_30%	0,72	0	1,70	0,81	0,7	0,86
R2_10%	0	0,24	2,18	0,81	0,7	0,86
R2_20%	0	0,48	1,94	0,81	0,7	0,86
R2_30%	0	0,72	1,70	0,81	0,7	0,86

Fonte: a autora

A confecção das argamassas foi realizada de acordo com a NBR 16541 (ABNT, 2016b). Todo o material utilizado na confecção dos corpos de prova (areia, cimento e resíduos) foi seco em uma estufa (marca Quimis, modelo Q317M), a 50°C por 72h. Os materiais (cimento, areia, resíduos) foram pesados em uma balança eletrônica de precisão 0,1g, marca Marte, modelo AD16K. Então, os materiais pesados foram adicionados à cuba de um misturador mecânico de argamassa, como indicado na NBR 7215 (ABNT, 1996), para a confecção da argamassa.

A moldagem das argamassas foi realizada, de acordo com a NBR 13279 (ABNT, 2005b), no Laboratório de Ensaios de Materiais (LEMAT/FACENS), em Sorocaba/SP, com temperatura ambiente. Foram confeccionados 9 corpos de prova prismáticos de cada uma das composições de argamassas apresentadas na Tabela 2, com exceção da argamassa sem resíduos, sendo 3 corpos de prova para cada tempo de cura de 7, 14 e 28 dias. Os corpos de prova com resíduo de corte e com resíduo de polimento foram confeccionados em dias diferentes devido à falta de moldes para a confecção total. Assim, optou-se por fazer 18 corpos de prova para a argamassa sem resíduos, sendo 9 corpos de prova de argamassa sem resíduos para cada dia de confecção.

Inicialmente, moldes metálicos prismáticos, com três compartimentos de dimensões

4cm x 4cm x 16cm, receberam uma camada de óleo mineral em suas faces internas a fim de facilitar a desmoldagem dos corpos de prova conforme as normas NBR 13279 (ABNT, 2005b) e NBR 7215 (ABNT, 1996). A Figura 8 apresenta as argamassas confeccionadas dentro dos moldes.

Figura 8: Argamassas moldadas descansando até o momento da desmoldagem



Fonte: a autora

O desmolde dos corpos de prova (Figura 9) se deu após 24 horas conforme a NBR 13279 (ABNT, 2005b) e, em seguida, os mesmos foram inseridos em uma câmara úmida (Figura 10), até alcançarem tempos de cura de 7, 14 e 28 dias, a fim de potencializar a hidratação do cimento, evitando a evaporação de água na mistura, viabilizando o alcance da durabilidade e resistência adequadas (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Figura 9: Corpos de prova desmoldados e identificados



Fonte: a autora

Figura 10: Câmara úmida com corpos de prova



Fonte: a autora

4.2.3 Caracterização das argamassas no estado fresco

Para as argamassas no estado fresco foi feito o ensaio de índice de consistência de acordo com a NBR 13276 (ABNT, 2016a), a qual recomenda que argamassas de revestimento e assentamento apresentem espalhamento médio de (260 ± 5) mm. Assim, este ensaio possibilitou a análise da trabalhabilidade das argamassas, parâmetro importante para verificar suas aplicações, principalmente como revestimento. Para isso, um molde tronco cônico foi colocado sobre uma mesa de adensamento (marca Solotest) limpa e seca e preenchido com argamassa, até um terço de sua altura. Com auxílio de um soquete foram aplicados 15 golpes para distribuir a mistura uniformemente. Em seguida, mais duas camadas da mistura foram colocadas dentro do molde, aplicando-se 10 e 5 golpes, respectivamente, até que ele ficasse completamente preenchido e pudesse ser retirado, como pode ser visto na Figura 11.

Figura 11: molde tronco cônico e soquete (esq.) e mesa de adensamento com argamassa após a retirada do molde (dir.)



Fonte: a autora

Então, acionou-se a manivela da mesa de adensamento, aplicando-se 30 quedas durante 30s e em seguida, mediu-se o espalhamento da argamassa com um paquímetro digital da marca Digimess, com resolução de $\pm 0,01$ mm, em três diâmetros diferentes. Esse procedimento foi feito para todas as argamassas apresentadas na Tabela 2. A Figura 12 mostra o espalhamento de uma das argamassas após os 30 golpes.

Figura 12: Espalhamento da argamassa após os golpes da mesa de adensamento



Fonte: a autora

4.2.4 Caracterização das argamassas no estado endurecido

4.2.4.1 Densidade aparente

A densidade aparente de uma argamassa corresponde à relação entre sua massa e seu volume e pode ser relacionada ao seu rendimento, pois quanto menor a densidade aparente, maior será o rendimento da argamassa no momento em que ela será aplicada (MATTANA; DE MEDEIROS; DA SILVA; DA COSTA, 2012). Além disso, sabe-se que quanto menor a densidade de uma argamassa, menor será o peso da edificação construída, o que pode ser benéfico sob o ponto de vista estrutural. Portanto, através deste ensaio foi possível constatar se a incorporação dos resíduos poderá alterar o rendimento das argamassas e o peso das edificações a serem confeccionadas com as mesmas.

As densidades dos corpos de prova no estado endurecido foram determinadas aos 7, 14 e 28 dias de cura, de acordo com a norma NBR 13280 (ABNT, 2005c), no Laboratório de Ensaio de Materiais (LEMAT/FACENS) em Sorocaba/SP. Cada corpo de prova foi pesado em uma balança eletrônica de precisão $\pm 0,01\text{g}$ da marca Marte, modelo As2000c, permitindo-se determinar a sua massa (m). As dimensões (altura, largura e comprimento) dos corpos de prova foram medidas com o auxílio de um paquímetro digital da marca Diginess, com resolução de $\pm 0,01\text{ mm}$. Com isso, foi possível calcular o volume dos corpos de prova de acordo com a equação 5 (ABNT, 2005c):

$$V = l \cdot h \cdot c \text{ (eq. 5)}$$

Onde:

V é o volume do corpo-de-prova, em m^3 ;

l é a largura do corpo-de-prova, em m;

h é a altura do corpo-de-prova, em m;

c é o comprimento do corpo-de-prova, em m.

A densidade aparente foi calculada a partir da equação 6 (ABNT, 2005c):

$$\rho_{m\acute{a}x} = \frac{m}{V} \text{ (eq. 6)}$$

Onde:

$\rho_{m\acute{a}x}$ é a densidade aparente no estado endurecido, em kg/m^3 ;

m é a massa do corpo-de-prova, em kg;

V é o volume do corpo-de-prova, em m^3 .

Os valores obtidos de densidades aparentes dos corpos de prova foram comparados com os valores apresentados na NBR 13281 (ABNT, 2005d) que classifica os corpos de M1 (densidade menor ou igual a 1200 kg/m^3) a M6 (densidade maior que 1800 kg/m^3).

4.2.4.2 Resistência à tração na flexão

Os ensaios de resistência mecânica, tanto o de tração na flexão quanto o de compressão, foram realizados no Laboratório de Ensaios de Materiais (LEMAT/FACENS) em Sorocaba/SP, conforme a NBR 13279 (ABNT, 2005b).

Os ensaios de resistência à tração na flexão foram realizados nos corpos de prova com 7, 14 e 28 dias de cura. Para esse ensaio, o corpo de prova foi colocado em um dispositivo de 3 pontos sobre o qual uma prensa hidráulica da marca Forney, modelo F-250C-LC1 (Figura 13), aplicou uma força de $(50 \pm 10) \text{ N/s}$ em uma das seções $40 \times 160 \text{ mm}$ de cada corpo de prova até o instante de sua ruptura.

Figura 13: Ensaio de resistência à tração na flexão



Fonte: a autora

Para determinar a resistência à tração na flexão, a equação 7 (ABNT, 2005b) foi utilizada:

$$R_t = \frac{1,5 * F_t * L}{40^3} \text{ (eq. 7)}$$

Onde:

R_t é a resistência à tração na flexão, em *MPa*;

F_t é a carga aplicada verticalmente no centro do prisma, em *N*;

L é a distância entre os apoios, em *mm*.

Os resultados obtidos foram comparados com os que estão apresentados na NBR 13281 (ABNT, 2005d), onde os corpos de prova são classificados de R1 (resistência à tração na flexão menor ou igual 1,5 MPa) a R6 (resistência à tração na flexão maior que 3,5 MPa).

4.2.4.3 Resistência à compressão

Para os ensaios de resistência à compressão, o corpo de prova foi posicionado em um dispositivo de base metálica de 40 x 40 mm, como mostra a Figura 14. Uma força de (500 ± 50) N foi aplicada pela mesma prensa hidráulica Forney, até que ocorresse o rompimento.

Figura 14: Ensaio de resistência à compressão



Fonte: a autora

Para determinar a resistência à compressão utilizou-se a equação 8 (ABNT, 2005b):

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \text{ (eq. 8)}$$

Onde:

R_c é a resistência à compressão, em *Mpa*;

F_c é a carga máxima aplicada, em *N*;

1600 é a área da seção quadrada do dispositivo, em *mm*².

Os resultados do ensaio de compressão também foram comparados com os valores contidos na NBR 13281 (ABNT, 2005d), onde as argamassas são classificadas de P1 (resistência à compressão menor ou igual a 2,0 MPa) a P6 (resistência à compressão maior que 8 MPa).

4.2.4.4 Absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica

Estes testes foram realizados de acordo com a NBR 9778 (ABNT, 2005a) no

laboratório NATEL da UNESP de Sorocaba, SP. Estes ensaios também foram realizados para os corpos de prova com 7, 14 e 28 dias de cura.

Para os ensaios de absorção de água, os corpos foram secos em uma estufa Quimis, modelo Q317M, onde permaneceram por 72h a 105 °C. Na sequência, foram retirados para que suas massas fossem pesadas em uma balança Marconi, modelo AS 1000C, de precisão $\pm 0,01$. Para fins de confirmação dos resultados, os mesmos corpos de prova foram inseridos novamente na estufa, a 105 °C por mais 24h e pesados. Esses corpos de prova foram imersos em água à temperatura ambiente por um período de 72 horas. Imediatamente após esse período, os mesmos foram removidos da água e com um papel absorvente o excesso de água foi retirado, para que então, suas massas saturadas pudessem ser medidas na balança analítica. Assim, os cálculos de absorção de água puderam ser realizados, com base na equação 9 (ABNT, 2005a).

$$A = \left[\frac{(M_{sat} - M_s)}{M_s} \right] * 100 \text{ (eq.9)}$$

Onde:

A é a absorção de água, em porcentagem;

M_{sat} é a massa da amostra saturada em água por 72h, em g;

M_s é a massa da amostra seca em estufa por 72h, em g.

Os ensaios de índice de vazios foram realizados utilizando-se uma balança hidrostática constituída de um dinamômetro da marca Pasco, que permite obter o peso do corpo imerso em água. A determinação das massas saturadas dos corpos de prova é realizada através da equação 10 (ABNT, 2005a). Esse ensaio foi feito em triplicata.

$$M_i = \left(\frac{W}{9,8} \right) * 1000 \text{ (eq. 10)}$$

Onde:

M_i é a massa da amostra saturada por 72h imersa em água, em g;

W é o peso da amostra imersa em água, em N .

O índice de vazios pôde ser calculado através da equação 11 (ABNT, 2005a):

$$l_v = \left(\frac{M_{sat} - M_s}{M_{sat} - M_i} \right) * 100 \quad (\text{eq. 11})$$

Onde:

I_i é o índice de vazios da amostra, em %.

Por fim, a massa específica da amostra seca e a massa específica da amostra saturada foram calculadas, respectivamente, conforme as equações 12 e 13 (ABNT, 2005a).

$$\rho_s = \frac{M_s}{M_{sat} - M_i} \rho_{\text{água}} \quad (\text{eq. 12})$$

$$\rho_{sat} = \frac{M_{sat}}{M_{sat} - M_i} \rho_{\text{água}} \quad (\text{eq. 13})$$

Onde:

ρ_s é a massa específica da amostra seca em estufa por 72h, em g/cm³;

ρ_{sat} é a massa específica da amostra saturada em água por 72h, em g/cm³.

4.2.4.5 Absorção de água por capilaridade

Este ensaio foi realizado no laboratório NATEL da UNESP de Sorocaba, apenas para os corpos de prova com 28 dias de cura, de acordo com a NBR 15259 (ABNT, 2005e). Primeiramente, os corpos de prova foram secos em estufa Quimis, modelo Q317M. Então, cada corpo de prova foi lixado e pesado, obtendo-se massas iniciais (m_0). Imediatamente, os corpos de prova foram inseridos em suportes onde apenas (5 ± 1) mm de suas faces quadradas (4cm x 4cm) foram imersos em água. Após 10 minutos, os corpos de prova foram retirados dos suportes, enxutos e pesados, obtendo-se massas m_{10} . Em seguida, eles foram inseridos novamente nos suportes até completar 90 minutos de imersão, quando, mais uma vez, foram retirados, enxutos e pesados para obtenção das massas m_{90} . Os cálculos referentes à absorção por capilaridade aos 90 minutos e ao coeficiente de capilaridade foram realizados conforme as equações 14 e 15 (ABNT, 2005e):

$$A_{90} = \frac{m_{90} - m_0}{16} \quad (\text{eq. 14})$$

$$C = m_{90} - m_{10} \quad (\text{eq. 15})$$

Onde:

A_t é a absorção de água por capilaridade, em g/cm²;

C é o coeficiente de capilaridade, em g/dm².min^{1/2}.

4.2.5 Forma de análise dos resultados – Análise estatística

O método de análise de variância (ANOVA) foi utilizado para análise estatística dos resultados dos ensaios, aos 28 dias de cura, de densidade aparente, absorção de água por imersão, índice de vazios, resistência à tração na flexão, resistência à compressão, massa específica seca, massa específica saturada e absorção de água por capilaridade. Com esse método, foi possível avaliar se houve diferenças significativas entre as médias dos resultados dos corpos de prova com 0%, 10%, 20% e 30% de resíduo de corte e resíduo de polimento, em cada um dos ensaios citados acima (LAPPONI, 2005). Nesse método, se as médias dos resultados dos corpos de prova forem semelhantes, será aplicada a hipótese chamada H_0 . Em contrapartida, se houver pelo menos uma diferença significativa entre as médias, será adotada a hipótese H_1 . Para isso, a ferramenta de análise de dados do MS Excel foi empregada, aplicando-se um índice de significância (α) de 5%. Os cálculos das análises das variações entre grupos, ou seja, entre as argamassas com as diversas porcentagens (0%, 10%, 20% e 30%) de resíduo de corte e polimento, e dentro dos grupos foram realizados a partir da soma dos quadrados entre os grupos (SQE) e dentro dos grupos (SQR), representadas pelas equações 16 e 17 (LAPPONI, 2005), respectivamente:

$$SQE = \sum_{j=1}^K \left[\frac{(\sum_{i=1}^n x_{ij})^2}{n} \right] - \left[\frac{(\sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^n x_{ij})^2}{N} \right] \quad (\text{eq. 16})$$

$$SQR = \sum_{j=1}^K \sum_{i=0}^n x_{ij}^2 - \sum_{j=1}^K \left[\frac{(\sum_{i=1}^n x_{ij})^2}{n} \right] \quad (\text{eq. 17})$$

Onde:

K é o número de grupos amostrais;

n é o número de amostras por grupo;

N é o número total de amostras.

Em seguida, foram calculados os graus de liberdade entre (glE) e dentro dos grupos (glR) indicados pelas equações 18 e 19 (LAPPONI, 2005), respectivamente:

$$glE = K - 1 \text{ (eq. 18)}$$

$$glR = N - K \text{ (eq. 19)}$$

Logo após, cálculos das médias do quadrado entre os grupos (MQE) e médias dos quadrados dentro dos grupos (MQR) foram realizados a partir das equações 20 e 21 (LAPPONI, 2005).

$$MQE = \frac{SQE}{glE} \text{ (eq. 20)}$$

$$MQR = \frac{SQR}{glR} \text{ (eq. 21)}$$

Então, o índice $F_{\text{observado}}$ pôde ser calculado e comparado ao $F_{\text{crítico}}$ que é resultante do cruzamento dos dados glE e glR. A equação que representa o índice $F_{\text{observado}}$ é a equação 22 (LAPPONI, 2005).

$$F = \frac{MQE}{MQR} \text{ (eq. 22)}$$

Nas análises deste estudo onde o resultado de $F_{\text{observado}}$ foi inferior ao do $F_{\text{crítico}}$, concluiu-se que não houve diferenças significativas entre os grupos estudados, validando-se a hipótese H_0 . Porém, onde o valor do $F_{\text{observado}}$ foi superior ao do $F_{\text{crítico}}$, constatou-se a existência de pelo menos uma diferença significativa, validando-se a hipótese H_1 .

Nos casos em que a hipótese H_1 foi constatada, realizou-se também o Teste de Tukey (COSTA NETO, 2002), com o qual avaliou-se a diferença das médias dos grupos amostrais a fim de identificar entre quais médias houve diferenças significativas. Para isso, primeiramente calculou-se a diferença mínima significativa através da expressão 23:

$$dms = q \sqrt{\frac{MQR}{n^\circ \text{ de repetições}}} \text{ (eq. 23)}$$

Onde q é o valor da amplitude estudentizada em função do cruzamento de dados do glR (grau de liberdade dentro dos grupos) e k (número de grupos amostrais) ao nível α de probabilidade (5%), cuja tabela com seus valores está apresentada no Anexo 1.

Quando a diferença entre duas médias foi superior à diferença mínima significativa ($(|\bar{x}_a - \bar{x}_b| \geq dms \rightarrow \mu_a \neq \mu_b)$), constatou-se que essas médias eram diferentes (diferença representativa). Em contrapartida, se a diferença entre duas médias foi inferior à diferença mínima significativa ($(|\bar{x}_a - \bar{x}_b| < dms \rightarrow \mu_a = \mu_b)$), constatou-se que essas médias eram iguais (diferença não representativa).

4.2.6 Aplicação da técnica de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

O presente estudo baseou-se nas normas ISO 14040 (ABNT, 2014a) e ISO 14044 (ABNT, 2014b), que apresentam diretrizes para a elaboração de uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) de produtos.

4.2.6.1 Objetivo

O objetivo desta ACV foi identificar impactos ambientais potenciais na confecção de argamassas ao substituir-se, parcialmente, a areia e o cimento por resíduos de corte (R1) e polimento (R2) de chapas brutas de rochas ornamentais, tendo como público alvo: marmorarias, indústrias de extração e beneficiamento primário de rochas ornamentais, construtoras, arquitetos, engenheiros civis, a comunidade acadêmica e o poder público.

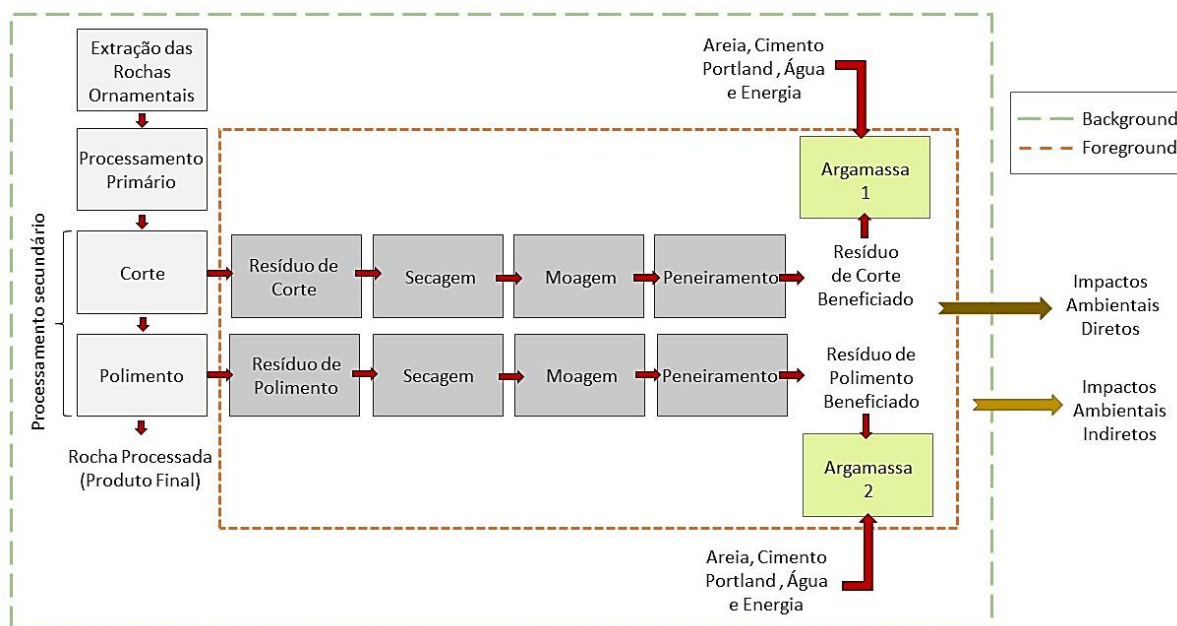
4.2.6.2 Sistema de produto

O sistema de produto avaliado foi a produção de argamassas com e sem resíduos de beneficiamento secundário de rochas ornamentais.

4.2.6.3 Fronteira do sistema de produto

Até o momento, os testes estão em escala laboratorial e por isso, as fases de uso e de descarte das argamassas com R1 e R2 não foram inseridas neste estudo. Assim, apenas os processos relacionados à obtenção dos resíduos e das matérias-primas (cimento Portland, areia e água) e à confecção das argamassas foram considerados. A Figura 15 apresenta as fronteiras do sistema de produto, com a abrangência adotada *cradle to gate* (do berço ao portão), onde o *foreground system* representa os processos do sistema de produto modelados pela autora e o *background system* representa os processos complementares do sistema de produto, cujos dados dos fluxos de entrada e saída foram retirados de bancos de dados já existentes e da literatura.

Figura 15: Fronteiras do sistema de produto



Fonte: a autora

4.2.6.4 Unidade funcional e Fluxo de referência

Segundo Silva (2012), em um estudo onde o produto é intermediário e a abrangência das fronteiras do sistema deste produto é *cradle to gate*, não levando em consideração a etapa de uso, a unidade funcional pode ser igual ao fluxo de referência. Portanto, neste trabalho com abordagem *cradle to gate* e com o produto sem uma função final definida, a unidade funcional e o fluxo de referência foram equivalentes à confecção de 3,93 kg de argamassa, capacidade máxima da cuba do misturador mecânico utilizado.

4.2.6.5 Alocação

A multifuncionalidade do sistema está presente nas etapas de corte e polimento das chapas brutas de rochas ornamentais, que além do produto (chapa acabada) geram também coprodutos (resíduos de corte e de polimento) a serem utilizados na confecção das argamassas. Assim, realizou-se uma alocação, onde houve uma repartição das entradas e saídas conforme a participação relativa com base em relações físicas (massas). A partir de pesquisas de campo feitas na marmoraria onde os resíduos foram coletados, constatou-se que cerca de 9% de cada chapa bruta é transformada em R1, 9% em R2 e 82% em produto final. Portanto, foram atribuídos 9% de impactos aos resíduos de corte e 9% aos resíduos de polimento, valores estimados pela marmoraria, visto que não há valores exatos pois depende dos tipos de peças produzidas pela marmoraria, conforme demanda dos clientes, que pode variar bastante.

4.2.6.6 Método de avaliação e categorias de impactos ambientais consideradas

O ciclo de vida das argamassas foi modelado utilizando-se o software gratuito OpenLCA 1.6.3. O método de AICV adotado neste trabalho foi o CML (baseline) [v4.4, January], com abordagem *midpoint*.

As categorias de impacto ambiental selecionadas para o estudo, de acordo com as características do produto, foram: acidificação potencial – média da Europa (AC), mudanças climáticas (CC), depleção dos recursos abióticos – elementos, reservas finais (DAR), depleção dos recursos abióticos – combustíveis fósseis (DARF), ecotoxicidade da água doce (FAE), toxicidade humana (HT), oxidação fotoquímica (PO) e ecotoxicidade terrestre (TE). A Tabela 3 apresenta uma descrição sucinta de cada uma delas, baseada em Silva (2012) e Souza (2012).

Tabela 3: Descrição das categorias de impactos consideradas neste estudo

CATEGORIA DE IMPACTO (CI)	UNIDADE	DESCRIÇÃO
Acidificação (AC)	kg SO ₂ eq	Emissão de substâncias como óxido de enxofre (SO _x) e nitrogênio (NO _x) para a atmosfera, causando chuvas que aumentam a acidez de solos e água.
Mudanças climáticas (CC)	kg CO ₂ eq.	Emissão de gases do efeito estufa, tais como o metano (CH ₄) e o dióxido de carbono (CO ₂), resultando em um aumento da temperatura na superfície terrestre (aquecimento global).
Depleção de recursos abióticos (DAR/DARF)	kg antimônio eq./ MJ	Impactos ambientais relacionados à extração de recursos naturais.
Ecotoxicidade de água doce (FAE)	kg 1,4 diclorobenzeno eq.	Emissão de substâncias tóxicas à rios e lagos, prejudicando a flora e a fauna.
Toxicidade humana (HT)	kg 1,4 diclorobenzeno eq.	Emissão de substâncias tóxicas aos seres humanos, os quais podem ingeri-las ou inalá-las.
Oxidação fotoquímica (PO)	kg etileno eq.	Emissão de compostos, como óxidos de nitrogênio (NO _x) e compostos orgânicos voláteis (VOCs), que reagem formando um nevoeiro fotoquímico, conhecido como <i>Smog</i> , o qual causa danos aos seres vivos.

Ecotoxicidade terrestre (TE)	kg 1,4 diclorobenzeno eq.	Emissão ao solo de substâncias tóxicas contaminantes.
-------------------------------------	---------------------------	---

Fonte: adaptada pela autora

4.2.6.7 Análise do Inventário do Ciclo de Vida (ICV)

Os dados relacionados aos processos de extração e beneficiamento de rochas ornamentais foram retirados do Inventário do Ciclo de Vida de Rochas Ornamentais elaborado por Castro, Gadioli, Wandermuren e Pazeto (2016). Já os dados referentes ao processo de beneficiamento dos resíduos de marmorarias, para se transformarem em coprodutos para as argamassas, foram obtidos a partir de ensaios laboratoriais, tendo em vista à falta de dados, na literatura. Considerou-se apenas a etapa de secagem dos resíduos, realizada em estufa Quimis, modelo Q317M, a 50°C por 72h. Os processos de moagem e peneiramento dos resíduos foram feitos manualmente, assim, não houve gastos relevantes de fluxos de materiais e energia associados a eles. Além disso, para este estudo, assumiu-se que o beneficiamento dos resíduos foi feito na própria marmoraria onde eles foram produzidos.

Em relação aos processos de extração, beneficiamento, armazenagem e transporte da areia, os dados foram retirados da literatura, de Souza (2012).

Os dados associados à produção do cimento foram extraídos do banco de dados brasileiro SICV Brasil- Banco Nacional de Inventários do Ciclo de Vida. Além disso, do SICV Brasil também foram extraídos os dados relativos à cadeia de produção e distribuição da eletricidade.

Por fim, os dados da cadeia produtiva da água foram retirados do banco de dados ecoinvent, versão 3.3.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização dos resíduos e das matérias-primas das argamassas

5.1.1 *Massa específica*

A Tabela 4 mostra os resultados dos ensaios de massa específica, feitos em triplicata. Os valores apresentados na Tabela 4 correspondem à média e desvio padrão das medidas, e estas indicam que os dois tipos de resíduos estudados neste trabalho possuem massas específicas iguais dentro do erro experimental. Estes resultados são análogos aos apresentados por Gameiro, Brito e Silva (2014), Keleştemur, Arıcı, Yıldız e Gökçer (2014) e Sales, Sá e Santos (2014), em estudos sobre resíduos semelhantes aos estudados. Como pode-se observar, o valor de massa específica da areia é semelhante aos dos resíduos, demonstrando a sua compatibilidade com ambos e, portanto, sendo adequada a sua substituição parcial pelos mesmos.

Tabela 4: Massa específica dos materiais utilizados nas argamassas

Materiais	Massa Específica (g/cm³)
Resíduo de Corte	2,6 ± 0,2
Resíduo de Polimento	2,4 ± 0,3
Areia	2,6 ± 0,3
Cimento (informação do Fabricante)	3,0 ± 0,2

Fonte: a autora

5.1.2 *Teor de orgânicos*

A partir dos resultados dos ensaios de teor de orgânicos, realizados em triplicata, cujas médias estão apresentadas na Tabela 5, pode-se perceber que o resíduo de corte possui um teor de orgânicos menor que o resíduo de polimento, mas de modo geral os valores são próximos, representando cerca de 3% da composição desses resíduos, já que os mesmos são de origem mineral. O motivo pelo qual o resíduo de polimento possui mais teor de orgânicos

pode ser relacionado ao fato de que durante a etapa de polimento da rocha, resinas são aplicadas e, conseqüentemente, seus vestígios são misturados a esse resíduo.

Tabela 5: Teor de orgânico dos resíduos de corte e de polimento

Resíduos	Teor de orgânicos (%)
Resíduo de Corte (R1)	2,81 ± 0,07
Resíduo de Polimento (R2)	3,53 ± 0,19

Fonte: a autora

5.1.3 Análise granulométrica

Os resultados dos ensaios de granulometria com os dois tipos de resíduos estão dispostos nas Tabelas 6 e 7 e nas Figuras 16 e 17. De uma forma geral, o resíduo de corte e o resíduo de polimento apresentaram granulometrias semelhantes e ambos são mais finos do que é apresentado como requisito para os agregados miúdos, por isso não estão totalmente dentro das zonas ótima e utilizável, descritas na NBR 7211 (ABNT, 2009). Assim como no trabalho de Moura, Gonçalves e Leite (2002), o resíduo de corte apresenta mais de 70% de fração menor que 0,075mm. Já o resíduo de polimento apresenta aproximadamente 48% de fração menor que 0,075mm. Por outro lado, observa-se que a parcela mais fina dos resíduos pode realizar o papel de cimento nas argamassas, sem causar prejuízo às mesmas.

Assim, uma possível solução para essa diferença granulométrica seria a redução da quantidade de cimento, visto que uma parcela dos resíduos já estaria realizando essa função nas argamassas. Além disso, uma mistura de areia com cada resíduo poderia ser feita, ao invés de usar somente os resíduos, a fim de que a areia consiga suprir a quantidade de grãos maiores faltantes nos resíduos.

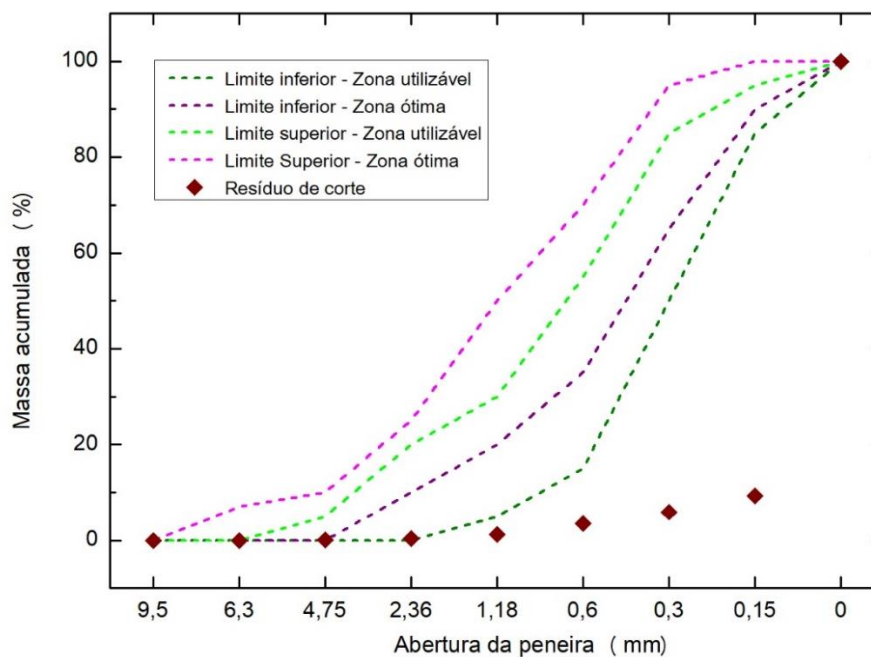
Entretanto, apesar de não estar completamente de acordo com as exigências da norma para agregados miúdos, a granulometria mais fina dos resíduos não interferiu significativamente nas resistências mecânicas dos corpos de prova, como será visto adiante.

Tabela 6: Análise granulométrica do resíduo de corte

Abertura (mm)	Massa Retida na Peneira (g)	Massa Retida na Peneira (%)	Massa Retida Acumulada (%)
Inicial	201,34	-	-
4,750	0,22	0,11	0,11
2,360	0,54	0,27	0,38
1,180	1,86	0,92	1,30
0,600	4,63	2,30	3,60
0,425	2,32	1,15	4,75
0,300	2,35	1,17	5,92
0,150	6,78	3,37	9,29
0,075	34,41	17,09	26,38
Fundo (prato)	148,23	73,62	100,00

Fonte: a autora

Figura 16: Análise granulométrica do resíduo de corte



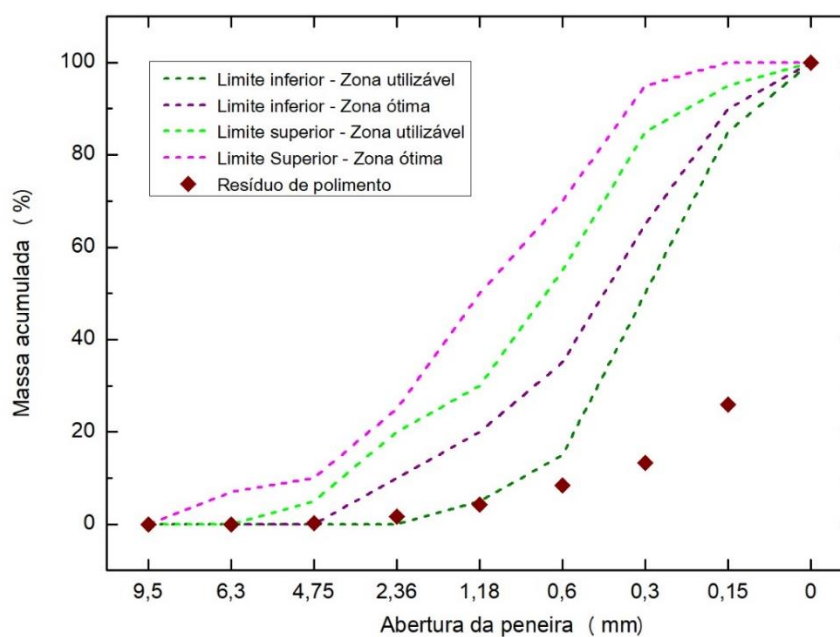
Fonte: a autora

Tabela 7: Análise granulométrica do resíduo de polimento

Abertura (mm)	Massa Retida na Peneira (g)	Massa Retida na Peneira (%)	Massa Retida Acumulada (%)
Inicial	201,52	-	-
4,750	0,38	0,19	0,19
2,360	3,06	1,52	1,71
1,180	5,14	2,55	4,26
0,600	8,43	4,18	8,44
0,425	5,00	2,48	10,92
0,300	4,91	2,44	13,36
0,150	25,23	12,52	25,88
0,075	53,26	26,43	52,31
Fundo (prato)	96,11	47,69	100,00

Fonte: a autora

Figura 17: Análise granulométrica do resíduo de polimento



Fonte: a autora

Além disso, também foi feito um ensaio de granulometria para o cimento e os resultados estão apresentados na Tabela 8.

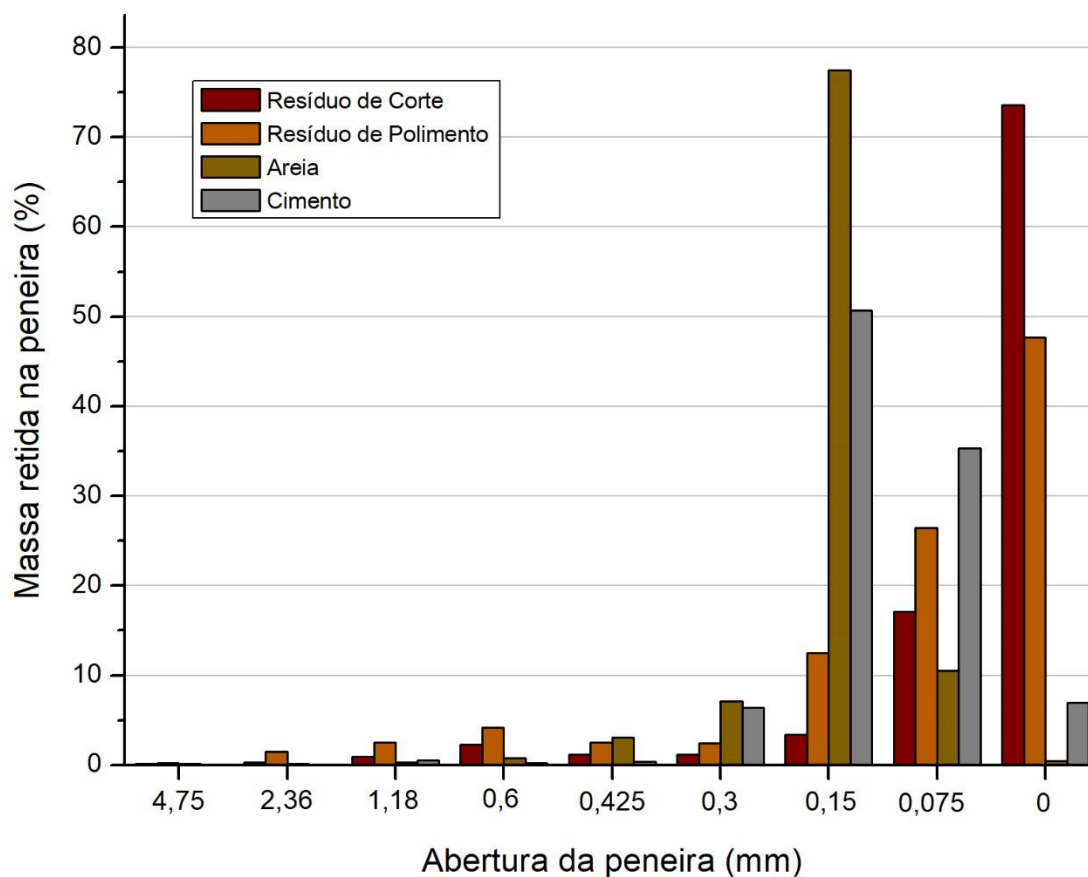
Tabela 8: Análise granulométrica do cimento

Abertura (mm)	Massa Retida na Peneira (g)	Massa Retida na Peneira (%)	Massa Retida Acumulada (%)
Inicial	198,11	-	-
4,750	0	0	0
2,360	0	0	0
1,180	0,10	0,05	0,05
0,600	0,44	0,22	0,27
0,425	0,77	0,39	0,66
0,300	12,64	6,38	7,04
0,150	100,37	50,66	57,7
0,075	70,02	35,34	93,04
Fundo (prato)	13,77	6,96	100,00

Fonte: a autora

Por fim, a partir da Figura 18, percebe-se que as maiores porcentagens das massas da areia e do cimento ficaram retidas nas peneiras de menores aberturas, 0,15mm e 0,075mm. Em relação aos dois tipos de resíduos, as maiores porcentagens de suas massas ficaram retidas na peneira de menor abertura (0,075mm) e no fundo.

Figura 18: Comparação da porcentagem de massa retida nas peneiras



Fonte: a autora

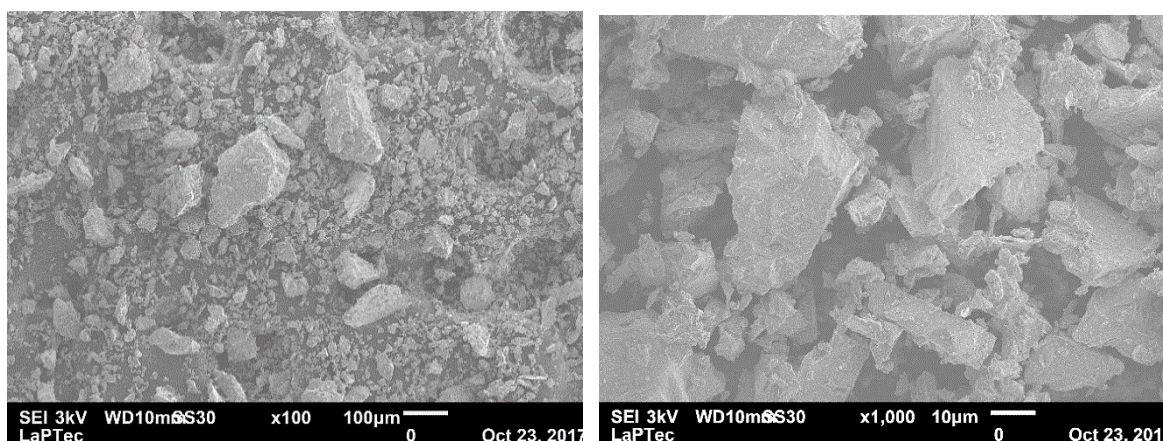
5.1.4 Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A micrografia do resíduo de corte pode ser vista na Figura 19, com aumentos de 100x e 1000x, respectivamente. Percebe-se que os grãos são heterogêneos, sem uma forma definida, possuindo formatos angulares diversos (lamelares) e textura suavemente rugosa. Esses formatos provavelmente são resultantes da diversidade mineral do resíduo e dos processos de beneficiamento das chapas de rochas ornamentais. De acordo com Cosme, Teixeira e Calmon (2016), os formatos lamelares podem contribuir para o intertravamento dos grãos em materiais como a argamassa. Em contrapartida, a textura suave e a presença de impurezas no resíduo, como SiO_2 , que será visto adiante, podem dificultar a aderência do resíduo aos agregados e aglutinantes. Isso seria prejudicial à argamassa, principalmente ao seu uso como revestimento.

Já a análise da composição química elementar desse resíduo está apresentada na Figura 20. Observa-se que predominam na sua composição química Si, Al, Ca, assim como

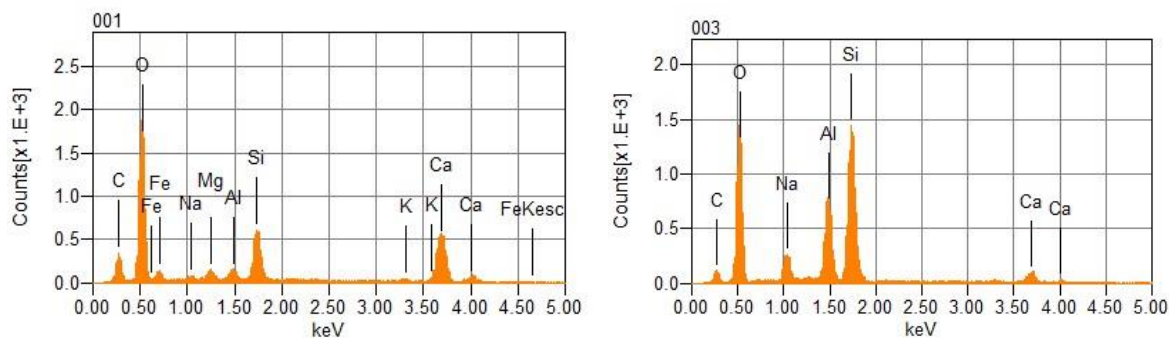
nas análises de Sales, Sá e Santos (2014). Outros componentes, como Na, Mg, K, C e Fe, também estão presentes, como Moura, Gonçalves e Leite (2002) mostram em seus resultados com resíduo de corte de mármore e granito. A presença de C pode relacionar-se ao baixo teor de orgânicos obtido no ensaio anterior ou à fita de carbono utilizada na preparação das amostras. Já a presença de Fe pode ser explicada devido ao desgaste dos discos da máquina de corte, que pode ser agregado ao resíduo.

Figura 19: Micrografia do resíduo de corte com aumentos de 100x (esq.) e 1000x (dir.)



Fonte: a autora

Figura 20: EDS do resíduo de corte



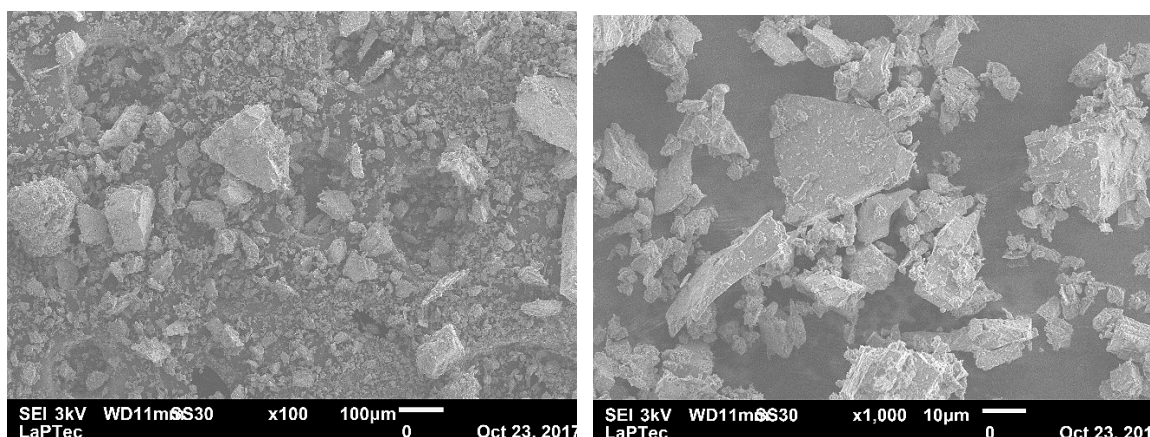
Fonte: a autora

A Figura 21 apresenta a micrografia do resíduo de polimento, com aumentos de 100x e 1000x, respectivamente. Percebe-se que, assim como os grãos do resíduo de corte, os grãos de polimento também possuem morfologia heterogênea, com formas não definidas, lamelares, angulares e prismáticas, e textura levemente rugosa, semelhante à textura do resíduo de corte. Como já mencionado, apesar das formas lamelares serem adequadas para o intertravamento dos grãos, essa textura de rugosidade suave atrelada às impurezas

presentes no resíduo (SiO_2) poderiam influenciar negativamente em sua aderência às outras matérias-primas da argamassa.

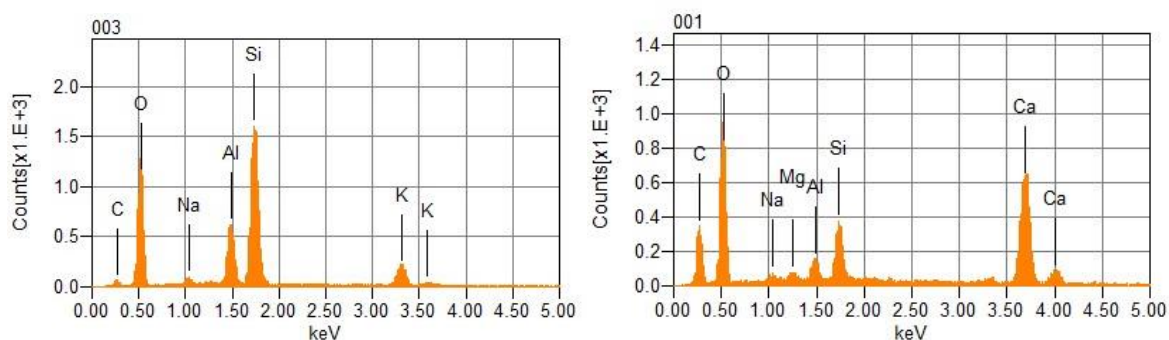
A análise elementar desse resíduo pode ser vista na Figura 22. Em sua composição química predominam Si, Al, Ca, C e Mg, assim como Keleştemur, Arıcı, Yıldız e Gökçer (2014) descrevem em seu trabalho com pó de mármore, e K e Na, como se observa no trabalho de Vardhan, Goyal, Siddique e Singh (2015), também com pó de mármore.

Figura 21: Micrografia do resíduo de polimento com aumentos de 100x (esq.) e 1000x (dir.)



Fonte: a autora

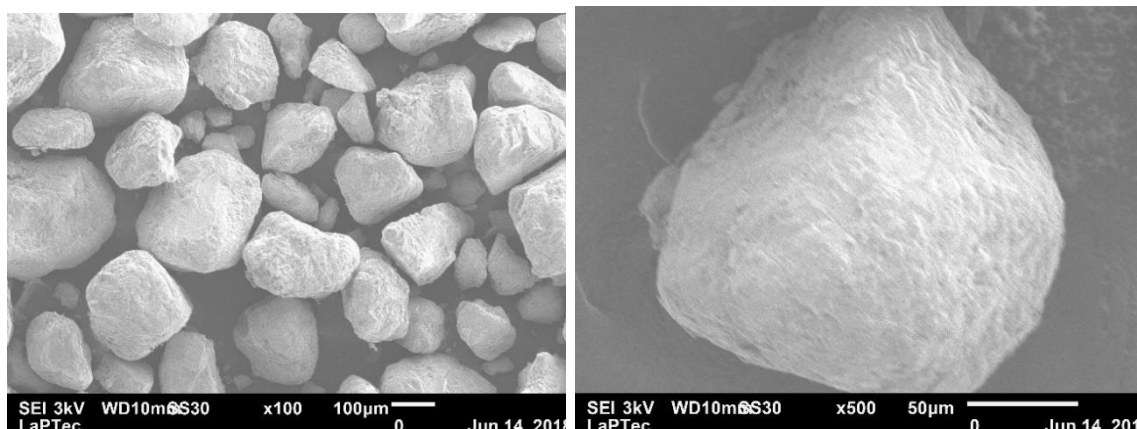
Figura 22: EDS do resíduo de polimento



Fonte: a autora

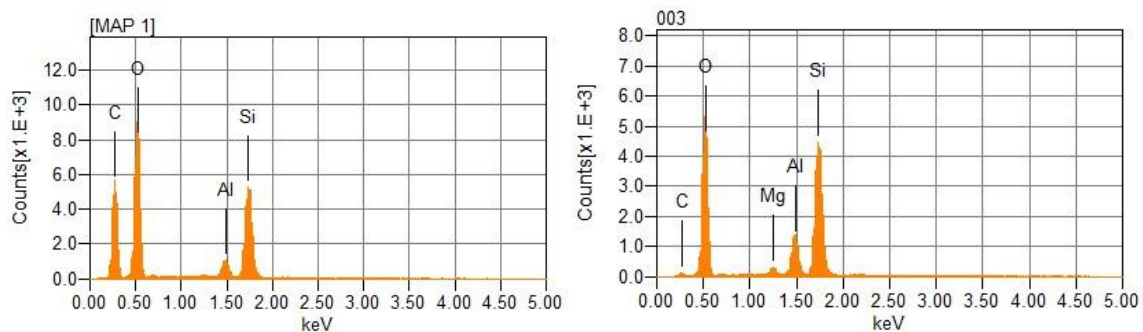
A micrografia da areia pode ser verificada na Figura 23 com aumentos de 100x e 500x. Os grãos da areia possuem formatos distintos dos grãos dos resíduos, são mais arredondados (esféricos), com textura um pouco mais rugosa e com maior dimensão. Em relação à sua composição química (Figura 24) percebe-se a predominância de Si, Al e Mg, elementos presentes também nos dois tipos de resíduos.

Figura 23: Micrografia da areia com aumentos de 100x (esq.) e 500x (dir)



Fonte: a autora

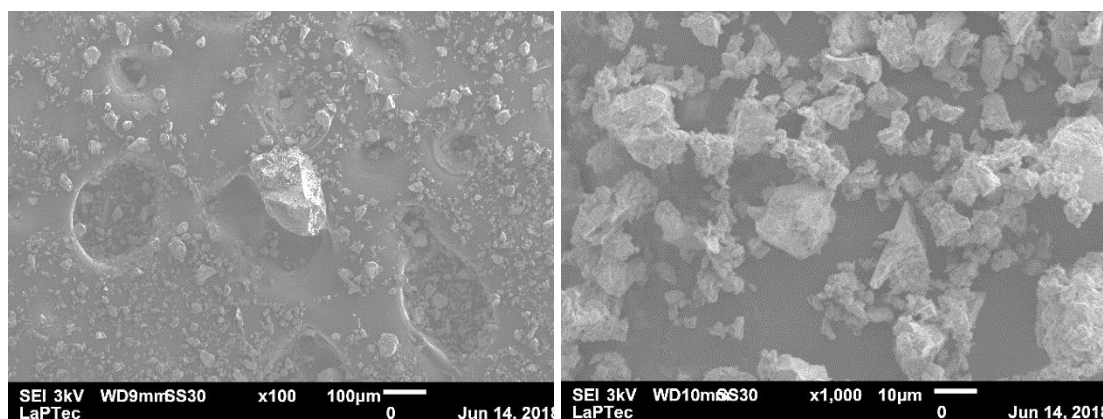
Figura 24: EDS da areia



Fonte: a autora

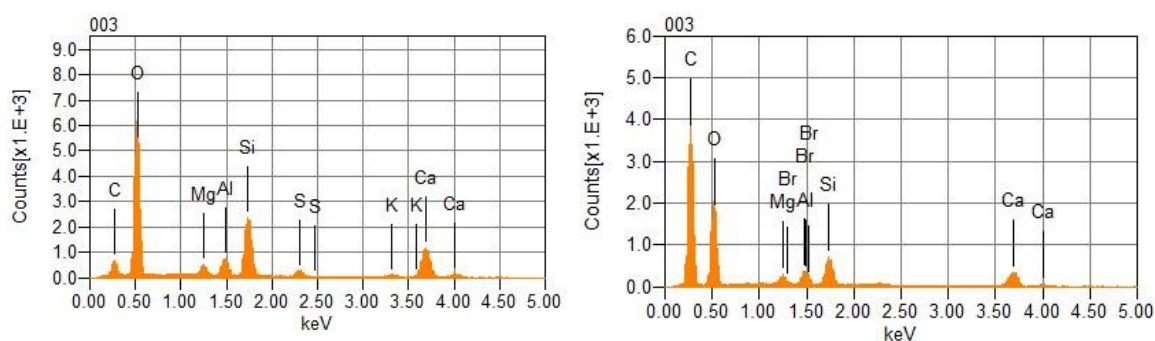
A micrografia do cimento está apresentada na Figura 25, com aumentos de 100x e 1000x, respectivamente. Seus grãos também não possuem uma forma bem definida, assim como os resíduos, e suas superfícies são mais rugosas que as dos outros materiais. Em relação à análise elementar, a Figura 26 mostra seus componentes. É notável a presença de Si, Al e Ca, Mg, S e K, elementos constituintes do cimento.

Figura 25: Micrografia do cimento com aumentos de 100x (esq.) e 1000x (dir.)



Fonte: a autora

Figura 26: EDS do cimento

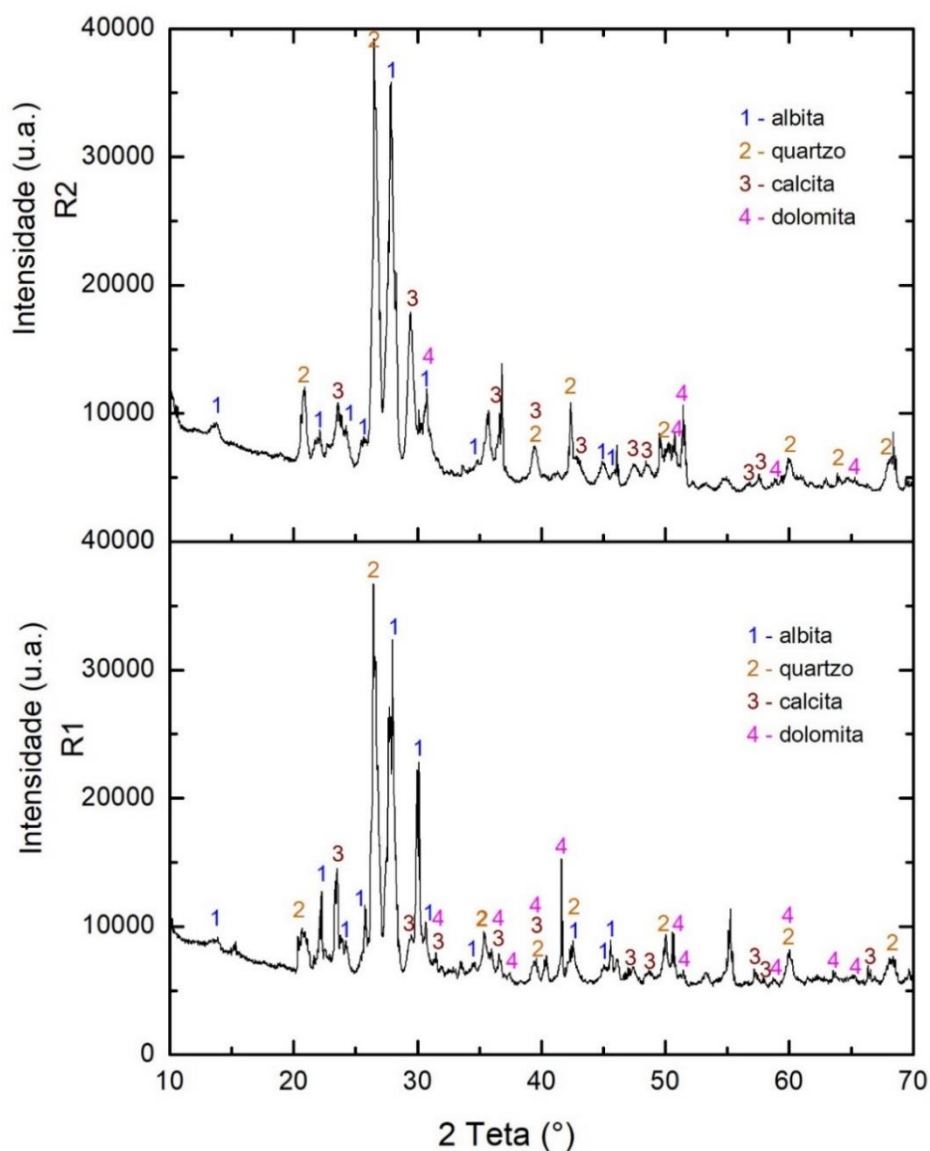


Fonte: a autora

5.1.5 Difração de Raios X (DRX)

A figura 27 apresenta os difratogramas com os picos obtidos através do ensaio de Difração de Raios X (DRX) para os resíduos de corte e polimento. Eles indicam a presença predominante de albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), quartzo (SiO_2), calcita (CaCO_3) e dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) em ambos os resíduos, resultados similares aos encontrados por Cosme, Teixeira e Calmon (2016), Sadek, El-attar e Ali (2016), Singh, Anshuman e Dipendu (2017), Soltan et al. (2016) e Vardhan, Goyal, Siddique e Singh (2015). Além disso, esses resultados comprovam o que foi apresentado na análise elementar dos resíduos (Figura 20 e 22), na qual Na, Al, Si, Ca, C e O apareceram como principais elementos presentes nos mesmos.

Figura 27: Difratoograma dos resíduos de corte (R1) e de polimento (R2)



Fonte: a autora

A Tabela 9 relaciona os picos identificados nos difratogramas com suas respectivas fichas de identificação.

Tabela 9: Fichas de identificação dos minerais encontrados nos difratogramas

Mineral	Fórmula	Número da Ficha [PDF] e nome de identificação
Albita	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	[9-466] Albite, ordered/ Sodium Aluminum Silicate
Quartzo	SiO_2	[46-1045] Quartz, syn/ Silicon Oxide
Calcita	CaCO_3	[4-637] Calcite/ Calcium Carbonate
Dolomita	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	[2-767] Dolomite/ Calcium Magnesium Carbonate

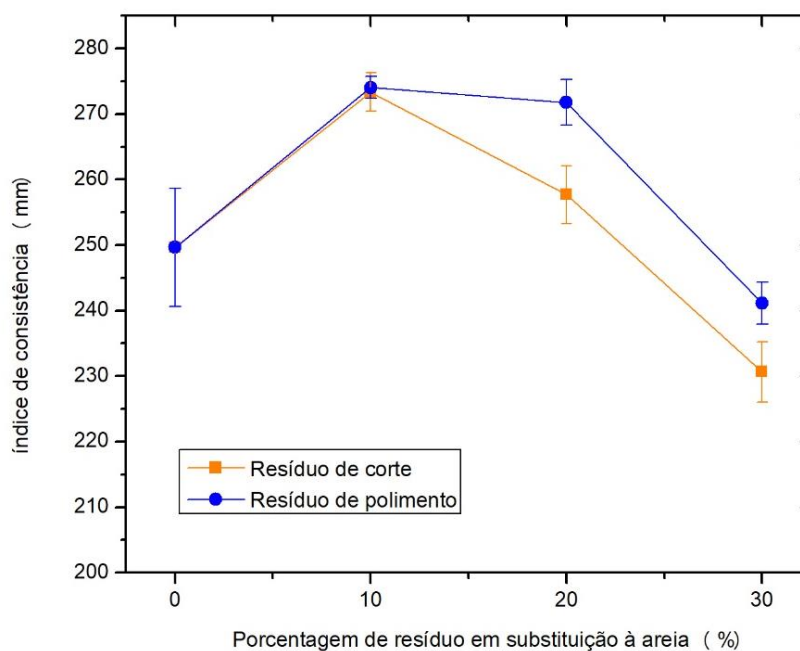
Fonte: a autora

5.2 Caracterização das argamassas no estado fresco

5.2.1 *Índice de consistência*

Considerando que a quantidade de água incorporada foi a mesma na confecção de todas as argamassas, constata-se que, de uma forma geral, quanto maior a quantidade de resíduo de corte e resíduo de polimento em substituição à areia, menor o índice de consistência, como pode ser observado na Figura 28. Segundo a norma NBR 16541 (ABNT, 2016b), o índice de consistência recomendado, para argamassas de assentamento e revestimento, é de (260 ± 5) mm, o que sugere para as argamassas com 10% de resíduo de corte e de polimento e 20% de resíduo de polimento, reduzir-se um pouco a quantidade de água, e para as argamassas com 30% de ambos os resíduos, aumentar-se a quantidade de água incorporada. Essa demanda por água também foi observada por Bonavetti e Irassar (1994) que a justificam devido às grandes áreas superficiais dos resíduos de rochas, as quais proporcionam, ainda, uma maior coesão às argamassas (CORINALDESI; MORICONI; NAIK, 2010). Isso já era esperado, uma vez que, como foi visto na análise granulométrica, a maior parte das partículas dos resíduos apresentaram dimensões inferiores a 0,075mm. Já a argamassa com 20% de resíduo de corte apresenta valores de espalhamento semelhantes aos da argamassa sem resíduos e aos de Sales, Sá e Santos (2014), e, portanto, está dentro da norma.

Figura 28: índice de consistência das argamassas



Fonte: a autora

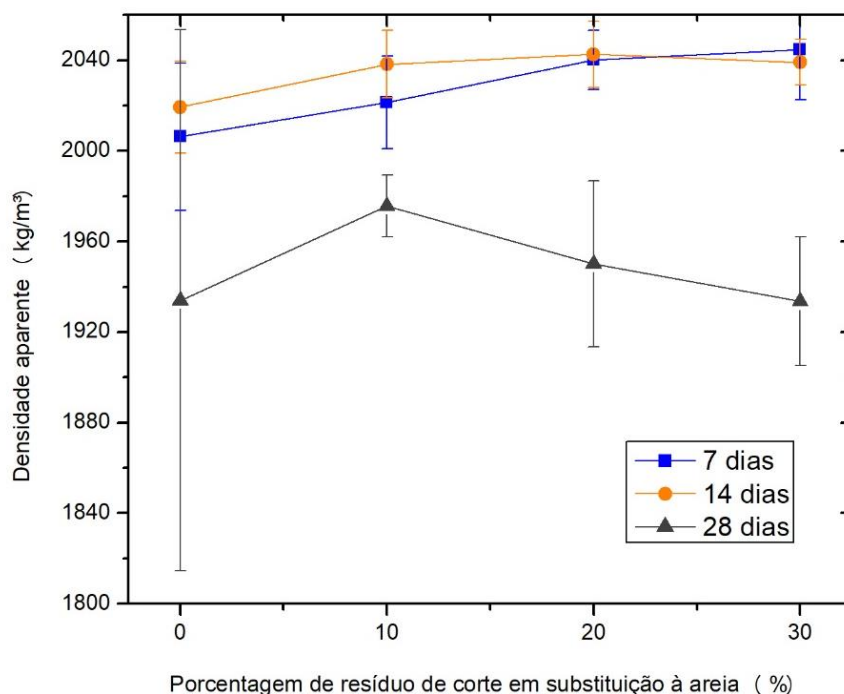
Sabe-se que o aumento da quantidade de água em argamassas e concretos pode levar a uma redução de resistência mecânica (BONAVETTI; IRASSAR, 1994). Entretanto, nos resultados seguintes de resistência à tração na flexão e à compressão, pode-se perceber que os corpos de prova com os dois resíduos se encontram nos níveis mais elevados de resistência de acordo com a classificação da NBR 13281 (ABNT, 2005d). Portanto, acredita-se que o aumento da quantidade de água nas argamassas com 30% de resíduo de corte e polimento não afetará consideravelmente a resistência mecânica das mesmas. Já no caso das argamassas com 10% dos dois tipos de resíduos e 20% de resíduo de polimento, a redução da quantidade de água poderia elevar ainda mais suas resistências. Desta forma, todas as argamassas estudadas poderiam ser utilizadas para assentamento e revestimento de paredes e tetos, pois estariam de acordo com a NBR 16541 (ABNT, 2016b).

5.3 Caracterização das argamassas no estado endurecido

5.3.1 Densidade aparente

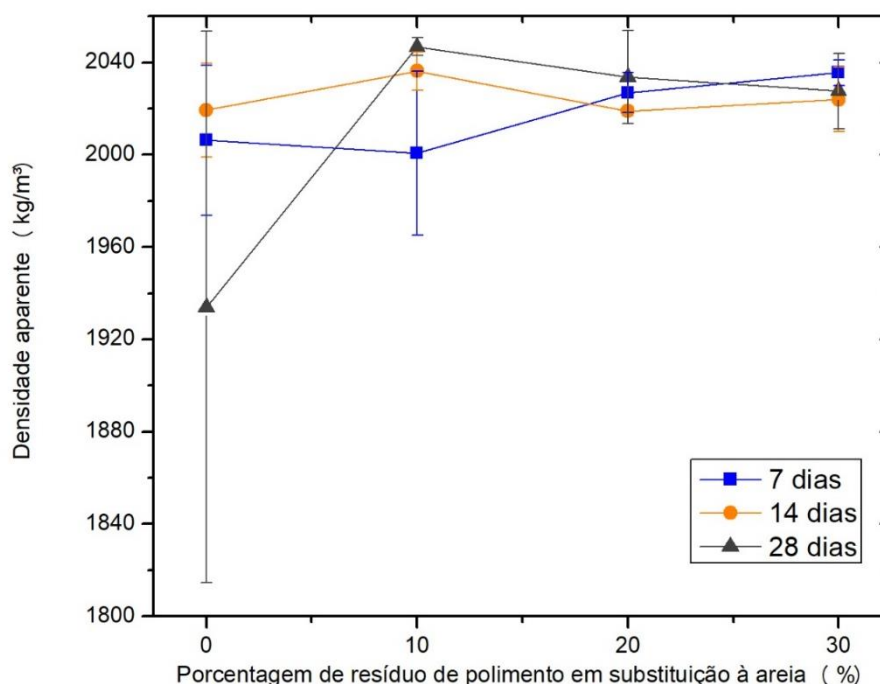
Os resultados de densidade aparente dos corpos de prova estão apresentados nas Figuras 29 e 30. Nota-se que os corpos de prova com resíduo de corte possuem densidades aparentes semelhantes às dos corpos de prova com resíduo de polimento, aos 7 e 14 dias de cura, e densidade aparente menor, aos 28 dias de cura. Essa redução de densidade aparente pode ter ocorrido devido às condições que influenciaram na temperatura e umidade do laboratório, e, conseqüentemente, na secagem dos corpos de prova retirados da câmara úmida, antes deste ensaio. Nota-se, ainda, que o desvio padrão dos resultados dos corpos de prova sem resíduo é mais elevado, o que pode ser justificado pela maior quantidade de corpos de prova sem resíduos submetidos aos ensaios, como mencionado anteriormente. Ademais, todos os corpos de prova podem ser classificados pela NBR 13281 (ABNT, 2005d) como M6, categoria de densidade aparente mais elevada, maior que 1800kg/m^3 .

Figura 29: Densidade aparente em argamassas com resíduo de corte



Fonte: a autora

Figura 30: Densidade aparente em argamassas com resíduo de polimento



Fonte: a autora

Além disso, percebe-se que, aos 28 dias de cura, os corpos de prova sem e com resíduo de corte, em teores de 10%, 20% e 30%, obtiveram resultados parecidos nos ensaios de densidade aparente (Tabela 10). O mesmo pode ser observado para os corpos de prova com resíduo de polimento (Tabela 11).

Tabela 10: Densidade aparente no estado endurecido aos 28 dias – corpos de prova com resíduo de corte

Massa de resíduo (%)	0	10	20	30
Densidade aparente no estado endurecido (kg/m³) 28 dias de cura	2044,32	1960,94	1911,69	1944,48
	2042,76	1978,54	1984,62	1901,26
	2040,58	1987,85	1954,10	1955,03
	1840,52			
	1828,66			
	1806,92			
Somatória	11603,76	5927,33	5850,41	5800,77
Média	1934	1976	1950	1934
Desvio	± 199	± 14	± 37	± 28
Variância	14269	187	1341	812

Fonte: a autora

Tabela 11: Densidade aparente no estado endurecido aos 28 dias – corpos de prova com resíduo de polimento

Massa de resíduo (%)	0	10	20	30
Densidade aparente no estado endurecido (kg/m ³) 28 dias de cura	2044,32	2048,47	2026,17	2039,56
	2042,76	2049,44	2056,53	2008,98
	2040,58	2042,33	2018,47	2034,3
	1840,52			
	1828,66			
	1806,92			
Somatória	11603,76	6140,24	6101,17	6082,84
Média	1934	2047	2034	2028
Desvio	± 199	± 4	± 20	± 16
Variância	14269	15	405	267

Fonte: a autora

As Tabelas 12 e 13 mostram as análises de variância (ANOVA) dos resultados de densidade aparente dos corpos de prova com e sem os resíduos, aos 28 dias de cura, onde os valores do $F_{\text{observado}}$ são menores que o valor do $F_{\text{crítico}}$ em ambos os casos, comprovando que a densidade aparente das argamassas, aos 28 dias de cura, não foi alterada consideravelmente com a adição dos resíduos.

Tabela 12: Análise de Variância (ANOVA) - Densidade aparente dos corpos de prova com e sem resíduo de corte

Fonte de variação	SQ	gl	MQ	$F_{\text{observado}}$	Valor-P	$F_{\text{crítico}}$
Entre grupos	4039,10	3	1346,36	0,19	0,898	3,59
Dentro dos grupos	76022,86	11	6911,17			
Total	80061,96	14				

Fonte: a autora

Tabela 13: Análise de Variância (ANOVA) - Densidade Aparente dos corpos de prova com e sem resíduo de polimento

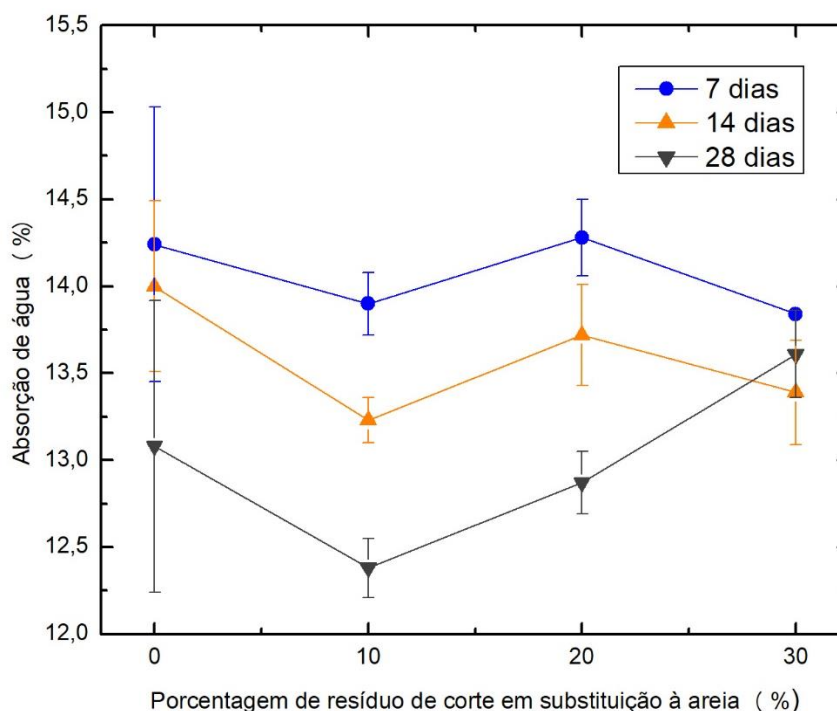
Fonte de variação	SQ	gl	MQ	$F_{\text{observado}}$	Valor-P	$F_{\text{crítico}}$
Entre grupos	38077,21	3	12692,40	1,92	0,185	3,59
Dentro dos grupos	72717,11	11	6610,65			
Total	110794,32	14				

Fonte: a autora

5.3.2 Absorção de água por imersão

Os resultados de porcentagem de absorção de água dos corpos de prova, com resíduo de corte, estão exibidos na Figura 31. Percebe-se que, com o passar do tempo de cura, os corpos de prova foram reduzindo sua capacidade de absorção. Isso ocorre em pastas de cimento, pois, com o passar do tempo de cura, há um aumento no grau de hidratação das mesmas, reduzindo a porosidade. Em outras palavras, com a cura do cimento, acontece a cristalização do mesmo, reduzindo a quantidade de vazios nas argamassas e, conseqüentemente, reduzindo também a absorção de água por elas (CINCOTTO, 2011; NEVILLE; BROOKS, 2013). Os valores de absorção obtidos neste ensaio estão de acordo com Bonavetti e Irassar (1994).

Figura 31: Porcentagem de absorção de água das argamassas com resíduo de corte



Fonte: a autora

Além disso, percebe-se que os valores de absorção de água por imersão dos corpos de prova, com e sem resíduo de corte, foram similares aos 28 dias de cura (Tabela 14). Essa similaridade foi confirmada pela análise de variância (ANOVA) desses valores (Tabela 15), onde o resultado do $F_{\text{observado}}$ foi inferior ao do $F_{\text{crítico}}$. Sendo assim, não existe nenhuma diferença significativa entre esses valores, ou seja, a incorporação de resíduos de corte nas argamassas não alterou a absorção de água por imersão.

Tabela 14: Absorção de água por imersão aos 28 dias de cura – corpos de prova com e sem resíduo de corte

Massa de resíduo (%)	0	10	20	30
Absorção de água por imersão (%) 28 dias de cura	13,83	12,47	13,05	13,85
	13,74	12,19	12,69	13,63
	13,93	12,5	12,85	13,36
	12,38			
	12,56			
	12,06			
Somatória	78,5	37,16	38,59	40,84
Média	13,1	12,4	12,9	13,6
Desvio	± 0,8	± 0,2	± 0,2	± 0,2
Variância	0,7	0,03	0,03	0,1

Fonte: a autora

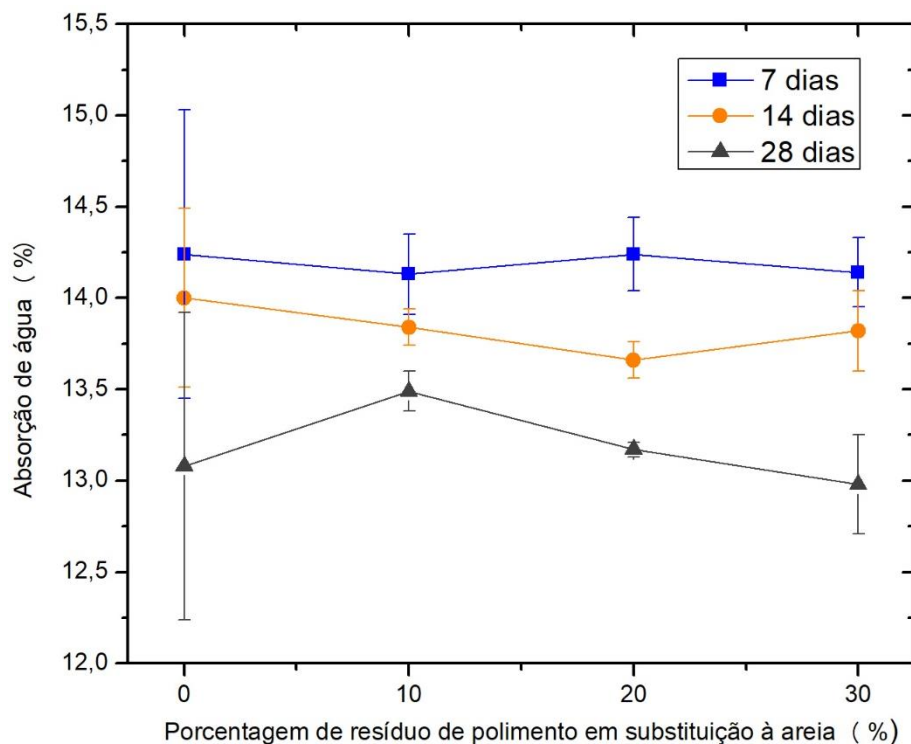
Tabela 15: Análise de Variância (ANOVA) - Absorção de água por imersão dos corpos de prova com resíduo de corte

Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F_{observado}	Valor-P	F_{crítico}
Entre grupos	2,35	3	0,78	2,29	0,135	3,59
Dentro dos grupos	3,77	11	0,34			
Total	6,12	14				

Fonte: a autora

A Figura 32 apresenta os resultados de absorção dos corpos de prova com resíduo de polimento. Nota-se que, com o passar do tempo de cura, os corpos de prova com resíduo de polimento também foram reduzindo sua capacidade de absorção, e aos 28 dias de idade, os valores de absorção dos corpos de prova sem e com as diferentes porcentagens do resíduo foram praticamente iguais (Tabela 16).

Figura 32: Porcentagem de absorção de água das argamassas com resíduo de polimento



Fonte: a autora

Tabela 16: Absorção de água por imersão aos 28 dias de cura - corpos de prova com e sem resíduo de polimento

Massa de resíduo (%)	0	10	20	30
Absorção de água por imersão (%) 28 dias de cura	13,83	13,55	13,19	12,7
	13,74	13,36	13,19	13,25
	13,93	13,54	13,12	12,98
	12,38			
	12,56			
	12,06			
Somatória	78,5	40,45	39,5	38,93
Média	13,1	13,5	13,17	13,0
Desvio	± 0,8	± 0,1	± 0,04	± 0,3
Variância	0,7	0,01	0,002	0,1

Fonte: a autora

A Tabela 17 apresenta os resultados da análise de variância (ANOVA) dos valores de absorção de água por imersão dos corpos de prova com e sem resíduo de polimento, aos 28 dias de cura. Nessa análise, novamente o valor do $F_{\text{observado}}$ foi inferior ao do $F_{\text{crítico}}$, o que

significa que a incorporação do resíduo de polimento nas argamassas também não alterou a absorção de água por imersão.

Tabela 17: Análise de Variância (ANOVA) - Absorção de água por imersão dos corpos de prova com resíduo de polimento

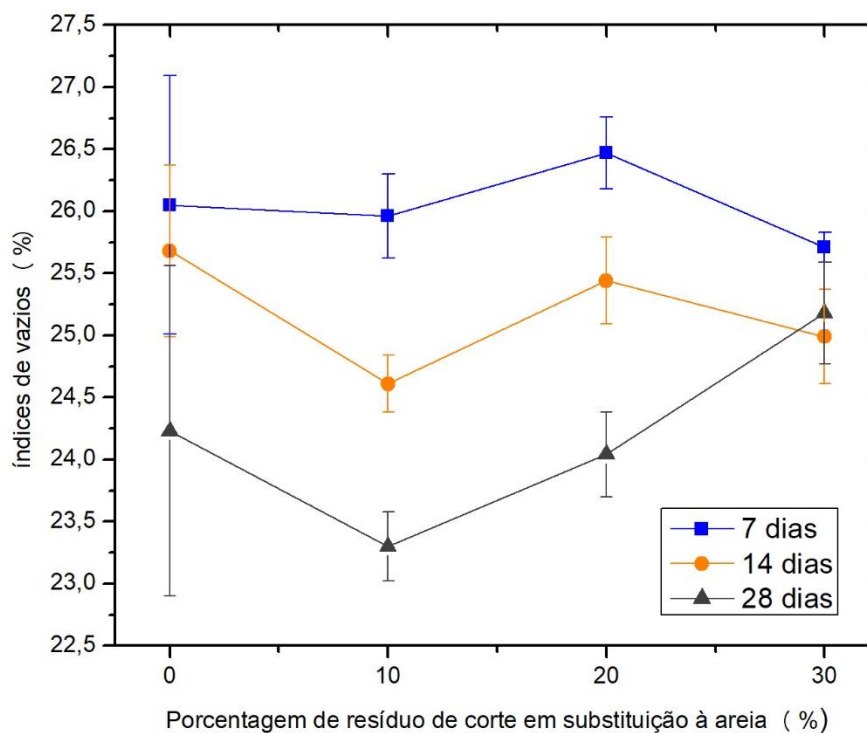
Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F _{observado}	Valor-P	F _{crítico}
Entre grupos	0,45	3	0,15	0,45	0,725	3,59
Dentro dos grupos	3,70	11	0,34			
Total	4,15	14				

Fonte: a autora

5.3.3 Índice de vazios

A Figura 33 apresenta os resultados de índices de vazios das argamassas com resíduos de corte. Nota-se que com o passar do tempo de cura, os corpos de prova com resíduo de corte tiveram seus índices de vazios reduzidos. Isso é o esperado, mostrando a cristalização do cimento com a cura (CINCOTTO, 2011; NEVILLE; BROOKS, 2013).

Figura 33: índice de vazios das argamassas com resíduo de corte



Fonte: a autora

Além disso, as argamassas com e sem resíduo de corte, aos 28 dias de idade, apresentaram similares índices de vazios, como pode-se observar na Tabela 18. Essa afirmação foi feita após a análise de variância (ANOVA) da Tabela 19 indicar a inexistência de diferença significativa entre os corpos de prova, visto que o valor do $F_{\text{observado}}$ foi inferior ao do $F_{\text{crítico}}$.

Tabela 18: índice de vazios aos 28 dias de cura – corpos de prova com resíduo de corte

Massa de resíduo (%)	0	10	20	30
Índice de vazios (%) 28 dias de cura	25,31	23,42	24,42	25,59
	25,32	22,97	23,75	25,19
	25,57	23,5	23,95	24,77
	23,19			
	23,46			
	22,52			
Somatória	145,37	69,89	72,12	75,55
Média	24	23,3	24,0	25,2
Desvio	± 1	± 0,3	± 0,3	± 0,4
Variância	2	0,1	0,1	0,2

Fonte: a autora

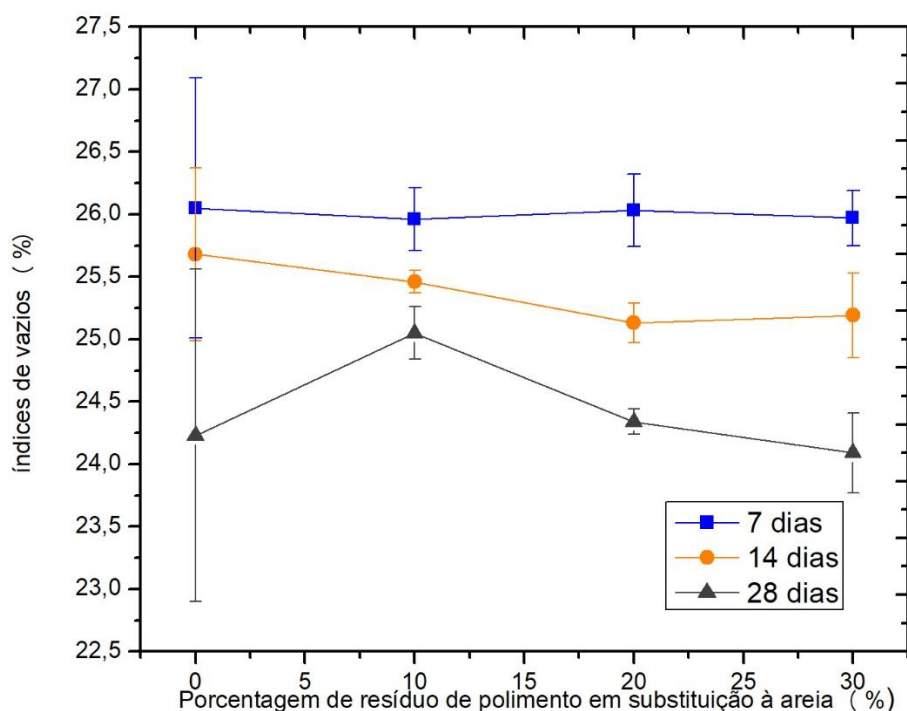
Tabela 19: Análise de Variância (ANOVA) - Índice de vazios dos corpos de prova com resíduo de corte

Fonte de variação	SQ	gl	MQ	$F_{\text{observado}}$	Valor-P	$F_{\text{crítico}}$
Entre grupos	5,43	3	1,81	2,10	0,158	3,59
Dentro dos grupos	9,48	11	0,86			
Total	14,91	14				

Fonte: a autora

A redução de índice de vazios, com o passar do tempo de cura, pode ser observada também nas argamassas com resíduos de polimento (Figura 34).

Figura 34: índice de vazios das argamassas com resíduo de polimento



Fonte: a autora

A partir da Tabela 20, nota-se a semelhança dos resultados de índices vazios entre os corpos de prova com e sem as diferentes porcentagens de resíduo de polimento. Essa semelhança foi comprovada com a análise de variância (ANOVA) apresentada na Tabela 21, onde, mais uma vez, o $F_{\text{observado}}$ foi inferior ao $F_{\text{crítico}}$.

Tabela 20: índice de vazios aos 28 dias de cura - corpos de prova com resíduo de polimento

Massa de resíduo (%)	0	10	20	30
Índice de vazios (%) 28 dias de cura	25,31	25,24	24,22	23,76
	25,32	24,82	24,38	24,4
	25,57	25,1	24,41	24,11
	23,19			
	23,46			
	22,52			
Somatória	145,37	75,16	73,01	72,27
Média	24	25,1	24,3	24,1
Desvio	± 1	± 0,2	± 0,1	± 0,3
Variância	2	0,1	0,01	0,1

Fonte: a autora

Tabela 21: Análise de Variância (ANOVA) - Índice de vazios dos corpos de prova com resíduo de polimento

Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F _{observado}	Valor-P	F _{crítico}
Entre grupos	1,75	3	0,58	0,71	0,566	3,59
Dentro dos grupos	9,07	11	0,82			
Total	10,82	14				

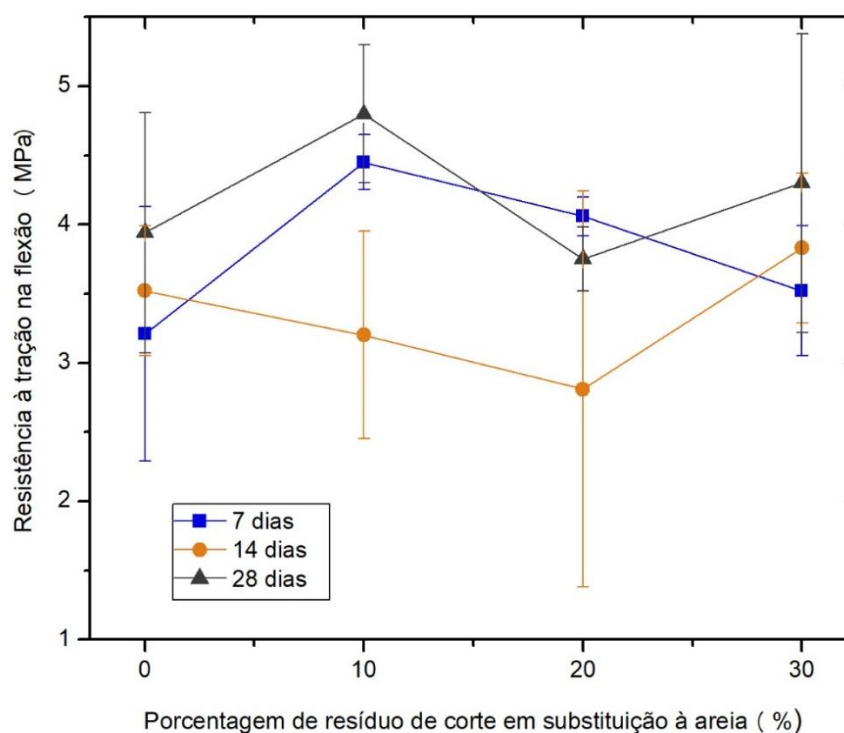
Fonte: a autora

Correlacionando os resultados de absorção de água por imersão com os resultados de índice de vazios, pode-se concluir que eles seguem a mesma lógica esperada: quanto maior o índice de vazios, maior a absorção nos corpos de prova com ambos os resíduos, em todas as idades. Além disso, pode-se perceber que, para os corpos de prova com resíduo de corte aos 28 dias de cura, quanto maior a quantidade de vazios, menor a densidade aparente.

5.3.4 Resistência à tração na flexão

Os resultados de resistência à tração na flexão dos corpos de prova com resíduo de corte estão exibidos na Figura 35. Os valores de resistência mecânica assemelham-se a alguns dos que foram apresentados por Bonavetti e Irassar (1994).

Figura 35: Resistência à tração na flexão de argamassas com resíduo de corte



Fonte: a autora

A partir da Tabela 22, é possível perceber também que, aos 28 dias de cura, os valores de resistência dos corpos de prova com e sem resíduo foram similares, classificando-se pela NBR 13281 (ABNT, 2005d) como materiais com resistências à tração na flexão nos níveis mais elevados: R5 (de 2,7 a 4,5 MPa) e R6 (acima de 3,5 MPa). A Tabela 23 atesta a similaridade entre os resultados de resistência, pois novamente o valor de do $F_{\text{observado}}$ foi menor que o valor do $F_{\text{crítico}}$.

Tabela 22: Resistência à tração na flexão aos 28 dias de cura – corpos de prova com resíduo de corte

Massa de resíduo (%)	0	10	20	30
Resistência à tração na flexão (MPa) 28 dias de cura	2,58	4,45	3,75	3,05
	3,75	5,16	3,98	4,92
	4,22		3,52	4,92
	4,92			
	4,22			
Somatória	19,69	9,61	11,25	12,89
Média	3,9	4,8	3,7	4
Desvio	± 0,9	± 0,5	± 0,2	± 1
Variância	0,7	0,2	0,1	2

Fonte: a autora

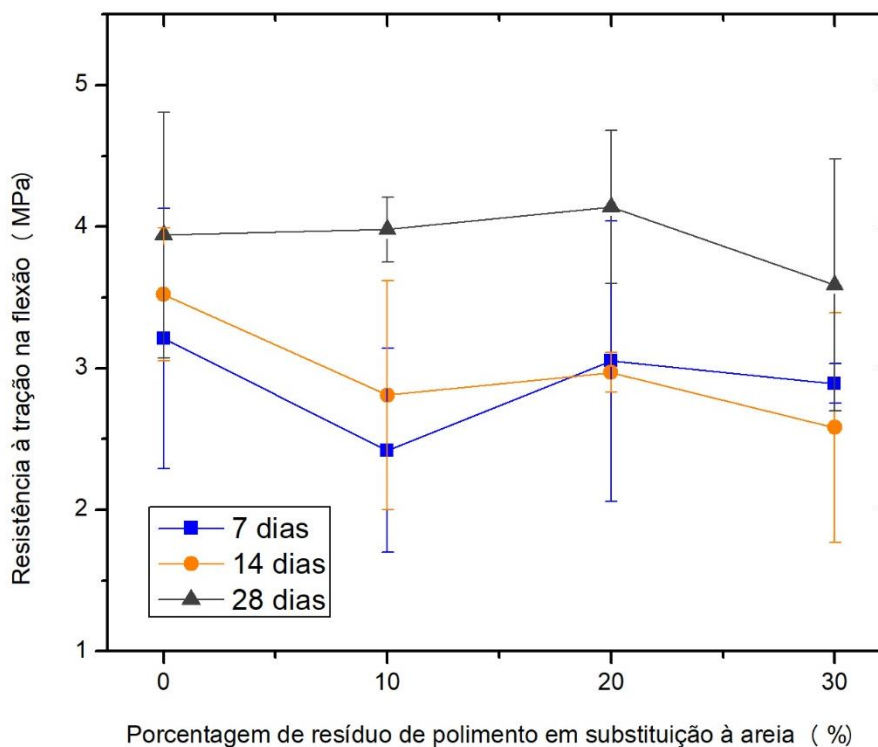
Tabela 23: Análise de Variância (ANOVA) – Resistência à tração na flexão dos corpos de prova com resíduo de corte

Fonte de variação	SQ	gl	MQ	$F_{\text{observado}}$	Valor-P	$F_{\text{crítico}}$
Entre grupos	1,61	3	0,53	0,85	0,502	3,86
Dentro dos grupos	5,69	9	0,63			
Total	7,30	12				

Fonte: a autora

Já os resultados de resistência à tração na flexão dos corpos de prova com resíduo de polimento estão apresentados na Figura 36.

Figura 36: Resistência à tração na flexão de argamassas com resíduo de polimento



Fonte: a autora

Aos 28 dias de cura, os corpos de prova com e sem resíduo apresentaram valores de resistência semelhantes entre si e maiores que aos 7 e 14 dias de cura, classificando-se como R5 e R6, categorias mais elevadas de resistência. Os valores, aos 28 dias de cura, foram mostrados também na Tabela 24. Já a Tabela 25 mostra a análise de variância (ANOVA) entre os resultados de resistência à tração na flexão dos corpos de prova com e sem as diferentes porcentagens de resíduo de polimento, aos 28 dias de cura. Essa análise confirma a inexistência de diferenças significativas entre todos os resultados, visto que o valor do $F_{\text{observado}}$ foi menor que o valor do $F_{\text{crítico}}$.

Tabela 24: Resistência à tração na flexão aos 28 dias de cura – corpos de prova com resíduo de polimento

Massa de resíduo (%)	0	10	20	30
Resistência à tração na flexão (MPa) 28 dias de cura	2,58	4,22	4,45	2,58
	3,75	3,75	4,45	4,22
	4,22	3,98	3,52	3,98
	4,92			
	4,22			
Somatória	19,69	11,95	12,42	10,78

Média	3,9	4,0	4,1	3,6
Desvio	± 0,9	± 0,2	± 0,5	± 0,9
Variância	0,7	0,1	0,3	0,8

Fonte: a autora

Tabela 25: Análise de Variância (ANOVA) - Resistência à tração na flexão dos corpos-de-prova com resíduo de polimento

Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F _{observado}	Valor-P	F _{crítico}
Entre grupos	0,48	3	0,16	0,30	0,822	3,71
Dentro dos grupos	5,26	10	0,52			
Total	5,74	13				

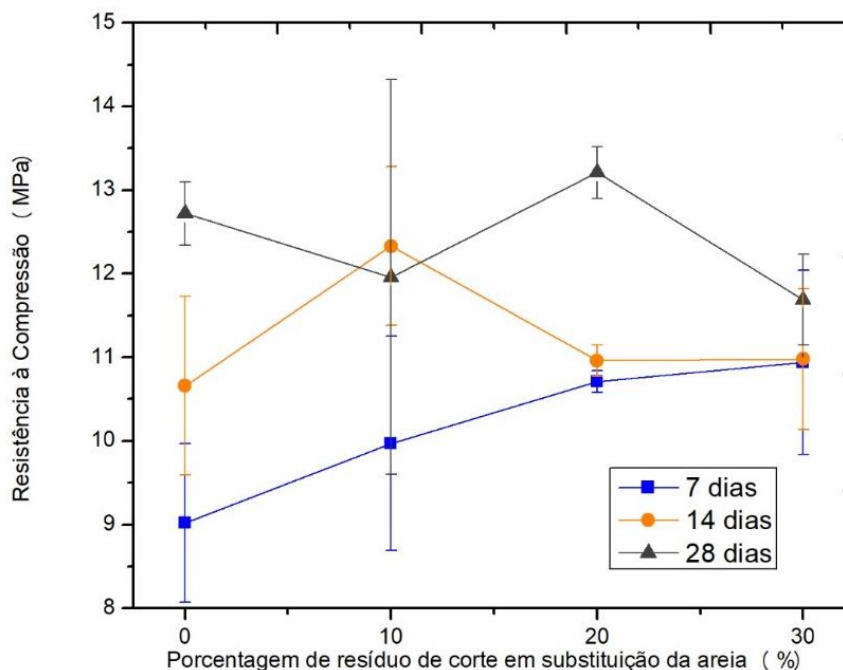
Fonte: a autora

Desse modo, o uso do resíduo de polimento e do resíduo de corte resultaram em argamassas com as mesmas classificações de resistências à tração na flexão, portanto, o uso de qualquer um dos resíduos irá resultar em argamassas com resistência elevada. Além disso, observou-se que, mesmo com o aumento das quantidades de resíduos de corte e polimento nas argamassas, a resistência à tração na flexão das mesmas não foi comprometida.

5.3.5 Resistência à compressão

A Figura 37 mostra os resultados de resistência à compressão das argamassas com resíduo de corte.

Figura 37: Resistência à compressão de argamassas com resíduo de corte



Fonte: a autora

A Tabela 26 mostra que, aos 28 dias de cura, os resultados de resistência à compressão dos corpos de prova com e sem resíduo foram semelhantes entre si, classificando-se como P6, classe de resistência mais elevada, maior que 8 MPa, pela NBR 13281 (ABNT, 2005d). Para confirmar a semelhança entre os resultados, realizou-se a análise de variância (ANOVA), apresentada na Tabela 27, onde é possível perceber que novamente o valor do $F_{\text{observado}}$ foi inferior ao valor do $F_{\text{crítico}}$. Desta maneira, constata-se que a resistência à compressão das argamassas não foi afetada com o aumento da porcentagem de incorporação do resíduo de corte.

Tabela 26: Resistência à compressão aos 28 dias de cura – corpos de prova com resíduo de corte

Massa de resíduo (%)	0	10	20	30
Resistência à compressão (MPa) 28 dias de cura	13,06	13,06	13,06	12
	12,38	13,56	13	12
	12,19	9,25	13,56	11,06
	12,88			
	13,13			
	12,69			
Somatória	76,33	35,87	39,62	35,06

Média	12,7	12	13,2	11,7
Desvio	± 0,4	± 2	± 0,3	± 0,5
Variância	0,1	6	0,1	0,3

Fonte: a autora

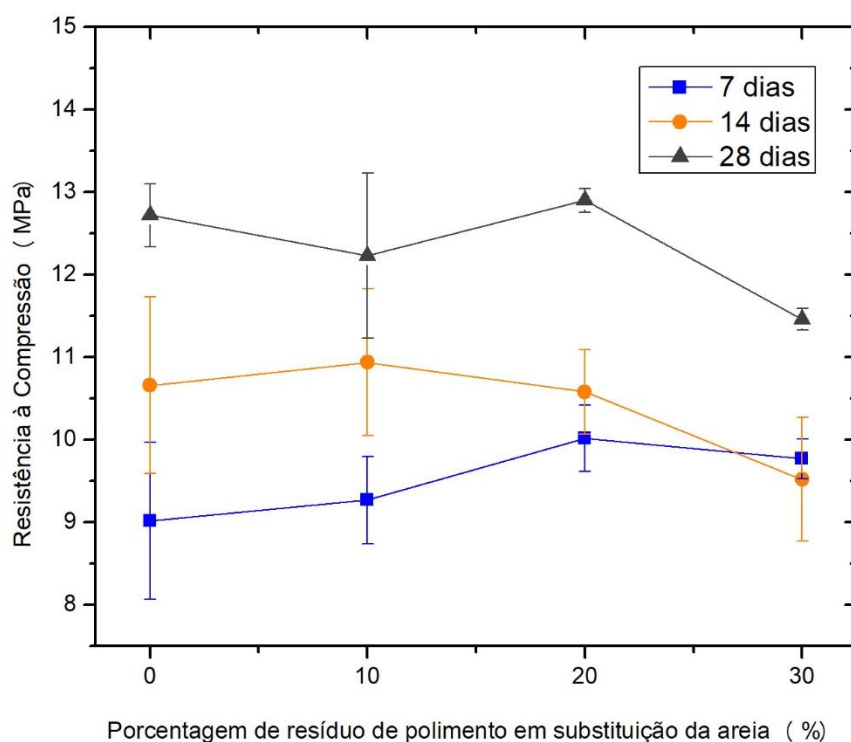
Tabela 27: Análise de Variância (ANOVA) - Resistência à compressão dos corpos de prova com resíduo de corte

Fonte de variação	SQ	Gl	MQ	F _{observado}	Valor-P	F _{crítico}
Entre grupos	4,64	3	1,55	1,35	0,309	3,59
Dentro dos grupos	12,60	11	1,15			
Total	17,24	14				

Fonte: a autora

Já os resultados de resistência à compressão dos corpos de prova com resíduo de polimento podem ser vistos na Figura 38.

Figura 38: Resistência à compressão de argamassas com resíduo de polimento



Fonte: a autora

Os resultados de resistência à compressão dos corpos de prova com e sem resíduo de polimento, aos 28 dias de cura, foram apresentados também na Tabela 28. Já a Tabela 29

apresenta a análise estatística (ANOVA) desses resultados, a qual indicou que há pelo menos uma diferença significativa entre eles, pois, neste caso, o valor do $F_{\text{observado}}$ foi maior que o valor do $F_{\text{crítico}}$.

Tabela 28: Resistência à compressão aos 28 dias de cura – corpos de prova com resíduo de polimento

Massa de resíduo (%)	0	10	20	30
Resistência à compressão (MPa) 28 dias de cura	13,06	11,81	13,06	11,5
	12,38	13,38	12,81	11,56
	12,19	11,5	12,81	11,31
	12,88			
	13,13			
	12,69			
Somatória	76,33	36,69	38,68	34,37
Média	12,7	12	12,9	11,5
Desvio	± 0,4	± 1	± 0,1	± 0,1
Variância	0,1	1	0,02	0,02

Fonte: a autora

Tabela 29: Análise de Variância (ANOVA) - Resistência à compressão dos corpos-de-prova com resíduo de polimento

Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F_{observado}	Valor-P	F_{crítico}
Entre grupos	4,11	3	1,37	5,35	0,016	3,59
Dentro dos grupos	2,81	11	0,26			
Total	6,92	14				

Fonte: a autora

A Tabela 30 mostra os resultados do Teste de Tukey para a resistência à compressão, aos 28 dias de cura, dos corpos de prova com e sem resíduo de polimento. Analisando-se a Tabela, é possível verificar que há diferenças significativas entre as médias de resistência à compressão das argamassas com 0% e 30% de resíduo e entre as argamassas com 20% e 30% de resíduo.

Tabela 30: Teste de Tukey - Resistência à compressão dos corpos de prova com e sem resíduo de polimento

Comparação		$ \bar{Xa} - \bar{Xb} $	Dms	Conclusão
Sem resíduos	R2_10%	0,7	1,065	NÃO REPRESENTATIVO
Sem resíduos	R2_20%	0,2		NÃO REPRESENTATIVO
Sem resíduos	R2_30%	1,2		REPRESENTATIVO
R2_10%	R2_20%	0,9		NÃO REPRESENTATIVO
R2_10%	R2_30%	0,5		NÃO REPRESENTATIVO
R2_20%	R2_30%	1,4		REPRESENTATIVO

Fonte: a autora

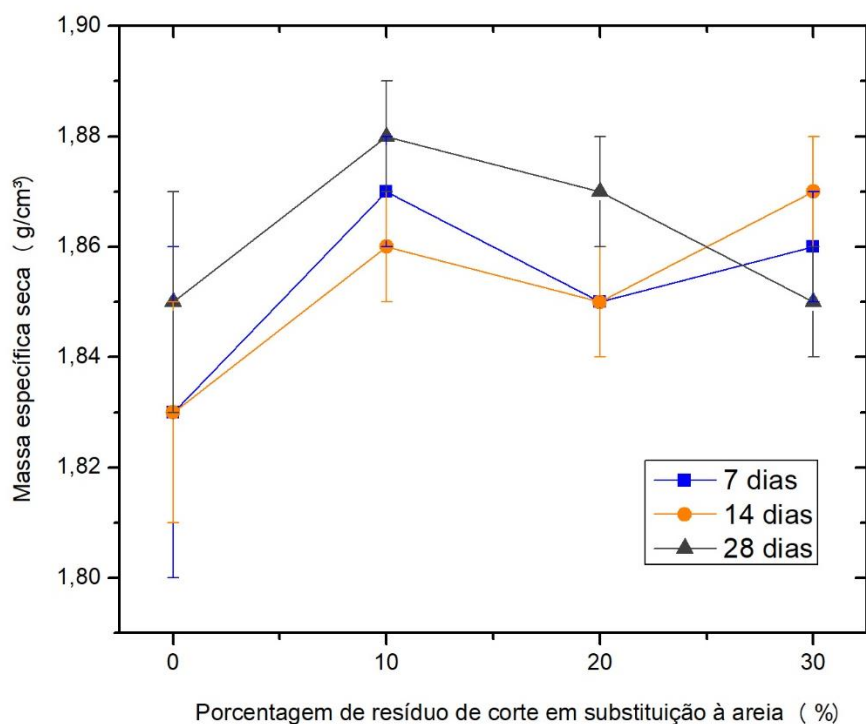
Entretanto, apesar do Teste de Tukey indicar uma redução significativa de resistência à compressão nas argamassas com 30% de resíduo de polimento, elas ainda foram consideradas argamassas de resistência mais elevada (maior que 8 MPa), pela NBR13281 (ABNT, 2005d).

Posto isto, constata-se que ambos os resíduos, empregados em porcentagens de 10%, 20% e 30% em substituição à areia, resultaram em argamassas com boas resistências à compressão, portanto, não há um resíduo que seja mais indicado que o outro para uso em relação a esta propriedade.

5.3.6 Massa específica seca

Os resultados dos ensaios de massa específica seca das argamassas com resíduo de corte estão apresentados na Figura 39.

Figura 39: Massa específica seca de argamassas com resíduo de corte



Fonte: a autora

Nota-se que, aos 28 dias de cura, os corpos de prova obtiveram massas específicas secas semelhantes entre si e aos corpos de prova com 7 e 14 dias de cura. A Tabela 31 também apresenta os resultados de massa específica seca das argamassas, aos 28 dias de cura. Já a Tabela 32 apresenta a análise de variância (ANOVA) para esses resultados, onde o valor do $F_{\text{observado}}$ foi um pouco maior que o valor do $F_{\text{crítico}}$, indicando a possibilidade de haver pelo menos uma diferença significativa entre eles. Porém, como os valores de $F_{\text{observado}}$ e $F_{\text{crítico}}$ ficaram bem próximos, o Teste de Tukey acusou a inexistência de diferenças significativas, visto que nenhuma diferença $|\bar{X}_a - \bar{X}_b|$ foi \geq ao valor da dms (Tabela 33).

Tabela 31: Massa específica seca aos 28 dias de cura - corpos de prova com resíduo de corte

Massa de resíduo (%)	0	10	20	30
Massa específica seca (g/cm³) 28 dias de cura	1,83	1,88	1,87	1,85
	1,84	1,88	1,87	1,85
	1,84	1,88	1,86	1,85
	1,87			
	1,87			
	1,87			

Somatória	11,12	5,64	5,6	5,55
Média	1,853	1,88	1,87	1,85
Desvio	± 0,02	± 0,01	± 0,01	± 0,01
Variância	0,00003	0	0,00003	7×10^{-32}

Fonte: a autora

Tabela 32: Análise de Variância (ANOVA) - Massa específica seca dos corpos de prova com resíduo de corte

Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F _{observado}	Valor-P	F _{crítico}
Entre grupos	0,002	3	0,0006	3,86	0,041	3,59
Dentro dos grupos	0,002	11	0,0002			
Total	0,004	14				

Fonte: a autora

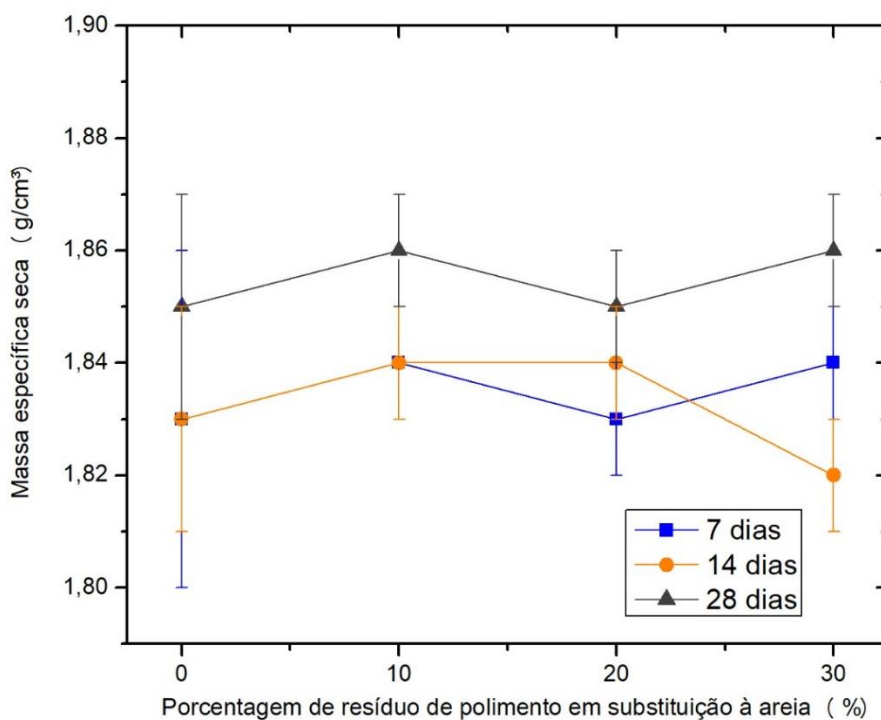
Tabela 33: Teste de Tukey – Massa específica seca dos corpos de prova com e sem resíduo de corte

Comparação		$ \bar{Xa} - \bar{Xb} $	Dms	Conclusão
Sem resíduos	R1_10%	0,027	0,0301	NÃO REPRESENTATIVO
Sem resíduos	R1_20%	0,017		NÃO REPRESENTATIVO
Sem resíduos	R1_30%	0,003		NÃO REPRESENTATIVO
R1_10%	R1_20%	0,01		NÃO REPRESENTATIVO
R1_10%	R1_30%	0,03		NÃO REPRESENTATIVO
R1_20%	R1_30%	0,02		NÃO REPRESENTATIVO

Fonte: a autora

Já os resultados dos ensaios de massa específica seca das argamassas com resíduo de polimento estão apresentados na Figura 40.

Figura 40: Massa específica seca de argamassas com resíduo de polimento



Fonte: a autora

É possível concluir que, aos 28 dias de cura, essas argamassas também obtiveram resultados de massa específica seca similares entre si e próximos aos valores de 7 e 14 dias. Os resultados, aos 28 dias de cura, foram apresentados também na Tabela 34 e a semelhança entre eles foi constatada a partir da análise de variância (ANOVA), apresentada na Tabela 35, onde o valor do $F_{\text{observado}}$ foi inferior ao valor do $F_{\text{crítico}}$.

Tabela 34: Massa específica seca aos 28 dias de cura – corpos de prova com resíduo de polimento

Massa de resíduo (%)	0	10	20	30
Massa específica seca (g/cm³) 28 dias de cura	1,83	1,86	1,84	1,87
	1,84	1,86	1,85	1,84
	1,84	1,85	1,86	1,86
	1,87			
	1,87			
	1,87			
Somatória	11,12	5,57	5,55	5,57
Média	1,85	1,86	1,85	1,86
Desvio	± 0,02	± 0,01	± 0,01	± 0,01
Variância	0,0003	0,00003	0,001	0,0002

Fonte: a autor

Tabela 35: Análise de Variância (ANOVA) - Massa específica seca dos corpos de prova com resíduo de polimento

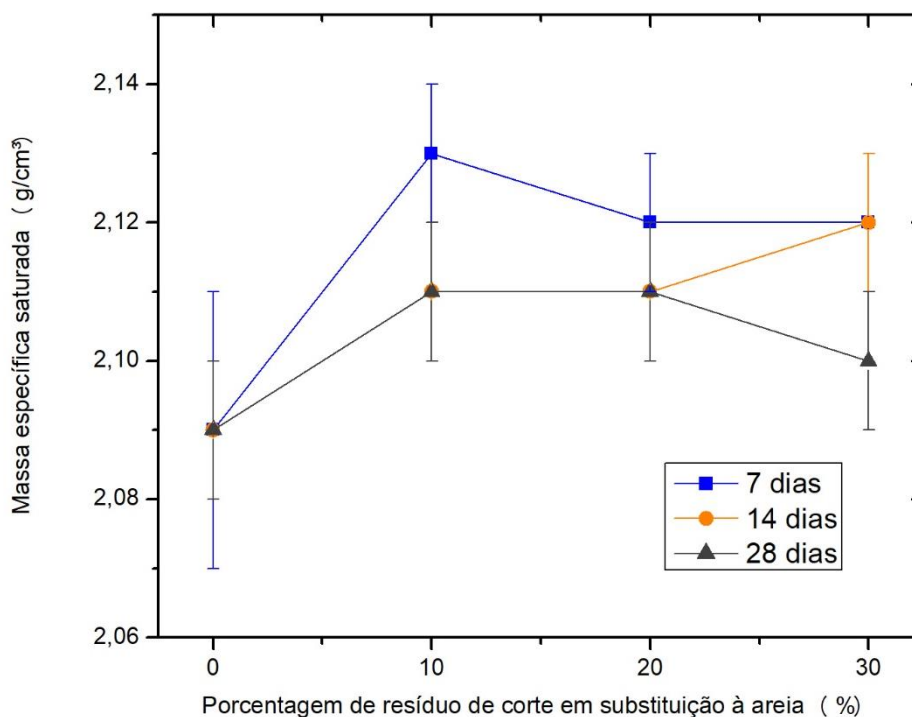
Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F _{observado}	Valor-P	F _{crítico}
Entre grupos	0,0001	3	0,00003	0,14	0,935	3,59
Dentro dos grupos	0,0024	11	0,00022			
Total	0,0025	14				

Fonte: a autora

5.3.7 Massa específica saturada

A Figura 41 apresenta os resultados do ensaio de massa específica saturada para os corpos de prova com e sem resíduo de corte.

Figura 41: Massa específica saturada de argamassas com resíduo de corte



Fonte: a autora

A Tabela 36 também apresenta os resultados de massa saturada dos corpos de prova com e sem resíduo de corte, aos 28 dias de cura, e a Tabela 37 apresenta a análise de variância (ANOVA) entre esses resultados. Com essa análise, é possível perceber que existe pelo menos uma diferença significativa entre os resultados, pois o valor do $F_{\text{observado}}$ foi um pouco superior ao valor do $F_{\text{crítico}}$.

Tabela 36: Massa específica saturada aos 28 dias de cura – corpos de prova com resíduo de corte

Massa de resíduo (%)	0	10	20	30
Massa específica saturada (g/cm ³) 28 dias de cura	2,08	2,11	2,11	2,1
	2,1	2,11	2,11	2,1
	2,09	2,12	2,1	2,1
	2,11			
	2,1			
	2,09			
Somatória	12,57	6,34	6,32	6,3
Média	2,095	2,113	2,107	2,10
Desvio	± 0,01	± 0,01	± 0,01	± 0,01
Variância	0,0001	0,00003	0,00003	0

Fonte: a autora

Tabela 37: Análise de Variância (ANOVA) - Massa específica saturada dos corpos de prova com resíduo de corte

Fonte de variação	SQ	GI	MQ	F _{observado}	Valor-P	F _{crítico}
Entre grupos	0,0007	3	0,00025	4,06	0,036	3,59
Dentro dos grupos	0,0007	11	0,00006			
Total	0,0014	14				

Fonte: a autora

O resultado do Teste de Tukey, para a massa específica saturada dos corpos de prova com e sem resíduo de corte, aos 28 dias de cura, está apresentado na Tabela 38. Analisando-se a Tabela, é possível verificar que há apenas uma diferença significativa, a qual se encontra entre as médias das argamassas com 0% e 10% de resíduo, pois $|\bar{X}_a - \bar{X}_b|$ foi maior que a *dms* calculada. Entretanto, entende-se que essa diferença foi pouco maior e que pode ter ocorrido devido às mudanças climáticas no laboratório durante os ensaios. Assim, acredita-se que as argamassas não foram consideravelmente afetadas com a incorporação de resíduo de corte.

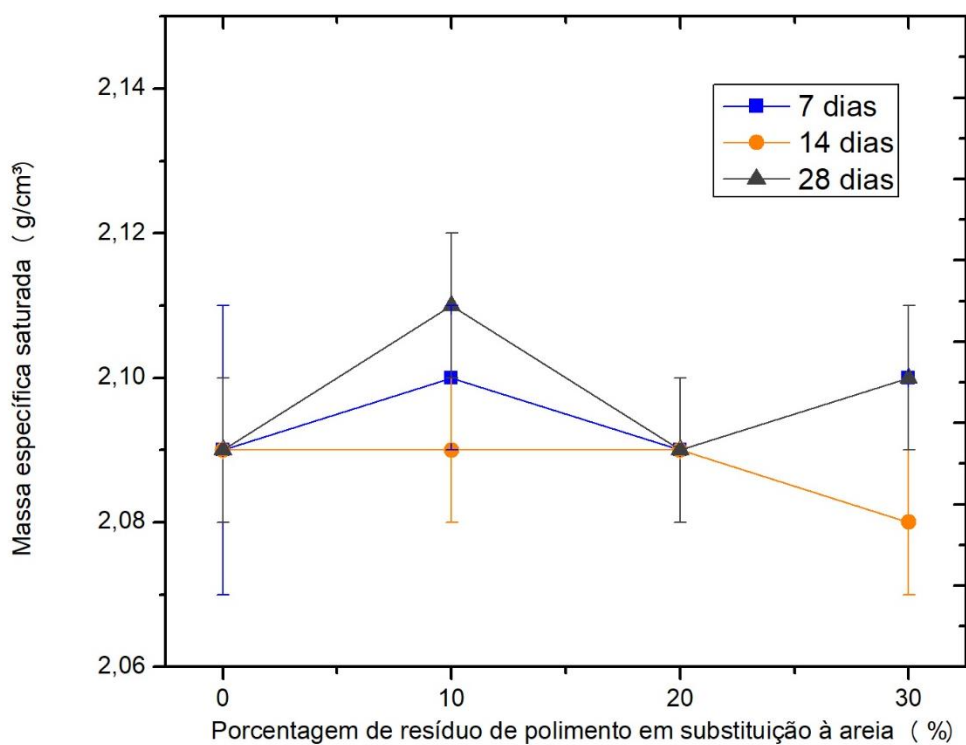
Tabela 38: Teste de Tukey – Massa específica seca dos corpos de prova com e sem resíduo de corte

Comparação		$ \bar{Xa} - \bar{Xb} $	Dms	Conclusão
Sem resíduos	R1_10%	0,018	0,017	REPRESENTATIVO
Sem resíduos	R1_20%	0,012		NÃO REPRESENTATIVO
Sem resíduos	R1_30%	0,005		NÃO REPRESENTATIVO
R1_10%	R1_20%	0,006		NÃO REPRESENTATIVO
R1_10%	R1_30%	0,013		NÃO REPRESENTATIVO
R1_20%	R1_30%	0,007		NÃO REPRESENTATIVO

Fonte: a autora

A Figura 42 apresenta os resultados do ensaio de massa específica saturada para os corpos de prova com e sem resíduo de polimento.

Figura 42: Massa específica saturada de argamassas com resíduo de polimento



Fonte: a autora

A partir da Figura 42 e da Tabela 39 é possível perceber que os resultados dos corpos de prova com e sem resíduo de polimento foram semelhantes, aos 28 dias de cura, o que foi confirmado pela análise de variância (ANOVA) apresentada na Tabela 40, onde o valor do

$F_{\text{observado}}$ foi inferior ao do $F_{\text{crítico}}$. Sendo assim, a incorporação de resíduo de polimento em argamassas não altera suas massas específicas saturadas.

Tabela 39: Massa específica saturada aos 28 dias de cura – corpos de prova com resíduo de polimento

Massa de resíduo (%)	0	10	20	30
Massa específica saturada (g/cm ³) 28 dias de cura	2,08	2,12	2,08	2,11
	2,1	2,11	2,09	2,09
	2,09	2,1	2,1	2,1
	2,11			
	2,1			
	2,09			
Somatória	12,57	6,33	6,27	6,3
Média	2,09	2,11	2,09	2,10
Desvio	± 0,01	± 0,01	± 0,01	± 0,01
Variância	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001

Fonte: a autora

Tabela 40: Análise de Variância (ANOVA) - Massa específica saturada dos corpos de prova com resíduo de polimento

Fonte de variação	SQ	gl	MQ	$F_{\text{observado}}$	Valor-P	$F_{\text{crítico}}$
Entre grupos	0,0007	3	0,0002	2,20	0,146	3,59
Dentro dos grupos	0,0011	11	0,0001			
Total	0,0018	14				

Fonte: a autora

5.3.8 Absorção de água por capilaridade

Por fim, os resultados de absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade referentes aos corpos de prova com e sem resíduo de corte e de polimento, aos 28 dias de cura, estão apresentados na Tabela 41. Eles estão de acordo com os obtidos por Mattana, De Medeiros, Da Silva e Da Costa (2012) e, como já esperado, mostram que quanto maior o coeficiente de capilaridade de uma argamassa, mais poros capilares existem nela e, consequentemente, mais água por capilaridade será absorvida.

Tabela 41: Coeficiente de capilaridade e absorção de água por capilaridade aos 28 dias de cura - corpos de prova com resíduo de corte e resíduo de polimento

Argamassa	Coeficiente de capilaridade (g/dm ² .min ^{0,5})	Absorção de água (g/cm ²) aos 90 minutos
Sem resíduos	2,9 ± 0,2	0,24 ± 0,07
R1_10%	6,9 ± 0,5	0,6 ± 0,03
R1_20%	8,4 ± 0,4	0,72 ± 0,05
R1_30%	5 ± 1	0,42 ± 0,06
R2_10%	7 ± 1	0,5 ± 0,1
R2_20%	2,9 ± 0,1	0,26 ± 0,01
R2_30%	1,6 ± 0,3	0,14 ± 0,03

Fonte: a autora

A partir da Tabela 41 é possível perceber diferenças significativas entre os resultados dos coeficientes de capilaridade dos corpos de prova com e sem resíduo de corte, as quais foram confirmadas com a análise de variância (ANOVA), mostrada na Tabela 42, onde o valor do $F_{\text{observado}}$ foi bem superior ao do $F_{\text{crítico}}$.

Tabela 42: Análise de Variância (ANOVA) - Coeficiente de capilaridade dos corpos de prova com resíduo de corte

Fonte de variação	SQ	gl	MQ	$F_{\text{observado}}$	Valor-P	$F_{\text{crítico}}$
Entre grupos	65,5	3	21,83	65,34	7,15E-07	3,71
Dentro dos grupos	3,3	10	0,33			
Total	68,8	13				

Fonte: a autora

O Teste de Tukey da Tabela 43 indica que nenhum resultado é igual ao outro, o que parece comum acontecer em ensaios de capilaridade, como foi observado também em Lampreia e Veiga (2014) e Mattana, De Medeiros, Da Silva e Da Costa (2012).

Tabela 43: Teste de Tukey – Coeficiente de capilaridade dos corpos de prova com e sem resíduo de corte

Comparação		$ \bar{X}_a - \bar{X}_b $	Dms	Conclusão
Sem resíduos	R1_10%	4	1,25	REPRESENTATIVO
Sem resíduos	R1_20%	1,5		REPRESENTATIVO
Sem resíduos	R1_30%	2,1		REPRESENTATIVO
R1_10%	R1_20%	1,5		REPRESENTATIVO

R1_10%	R1_30%	1,9		REPRESENTATIVO
R1_20%	R1_30%	3,4		REPRESENTATIVO

Fonte: a autora

Os resultados de coeficiente de capilaridade dos corpos de prova com resíduo de polimento também foram analisados pela técnica ANOVA e estão apresentados na Tabela 44. Novamente, percebe-se que há diferenças significativas entre os resultados, pois o valor do $F_{\text{observado}}$ foi maior do que o valor do $F_{\text{crítico}}$.

Tabela 44: Análise de Variância (ANOVA) - Coeficiente de capilaridade dos corpos de prova com resíduo de polimento

Fonte de variação	SQ	gl	MQ	$F_{\text{observado}}$	Valor-P	$F_{\text{crítico}}$
Entre grupos	42,33	3	14,11	61,68	9,39E-07	3,71
Dentro dos grupos	2,29	10	0,23			
Total	44,62	13				

Fonte: a autora

O Teste de Tukey, da Tabela 45, indicou a existência de diferenças significativas entre todos os coeficientes de capilaridade das argamassas com e sem resíduo de polimento, exceto entre os coeficientes das argamassas com 0% e 20% de resíduo.

Tabela 45: Teste de Tukey – Coeficiente de capilaridade dos corpos de prova com e sem resíduo de polimento

Comparação		$ \bar{X}_a - \bar{X}_b $	dms	Conclusão
Sem resíduos	R2_10%	3,7	1,04	REPRESENTATIVO
Sem resíduos	R2_20%	0		NÃO REPRESENTATIVO
Sem resíduos	R2_30%	1,3		REPRESENTATIVO
R2_10%	R2_20%	3,7		REPRESENTATIVO
R2_10%	R2_30%	5		REPRESENTATIVO
R2_20%	R2_30%	1,3		REPRESENTATIVO

Fonte: a autora

Além disso, pode-se observar que a incorporação de resíduo de corte causou um aumento maior na absorção e no coeficiente de capilaridade das argamassas do que a incorporação de resíduo de polimento. Isso pode ter ocorrido porque o resíduo de corte possui uma quantidade maior de partículas mais finas, como foi visto no ensaio de

granulometria (Figura 18). Dessa forma, essas partículas mais finas diminuem ainda mais o tamanho dos poros das argamassas, transformando-os em poros de diâmetros menores e, portanto, aumentando a absorção de água por capilaridade (BENACHOUR; DAVY; SKOCZYLAS; HOUARI, 2008).

Com este ensaio, constata-se, ainda, que as argamassas com 20% e 30% de resíduo de polimento podem ser consideradas as mais duráveis, pois quanto menor a absorção por capilaridade, maior a durabilidade do material (MATTANA; DE MEDEIROS; DA SILVA; DA COSTA, 2012), sendo assim, as melhores opções para o uso como revestimentos externos.

Por fim, a partir dos resultados de todos os ensaios físico-mecânicos realizados é possível perceber que tanto o resíduo de corte quanto o resíduo de polimento podem substituir a areia, em até 30%, em argamassas de revestimento e assentamento, sem alterar significativamente o desempenho das mesmas, sendo que para uso externo as argamassas com 20% e 30% de resíduo de polimento são as mais indicadas.

5.4 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) de argamassas com resíduos de beneficiamento secundário de rochas ornamentais

5.4.1 Análise do Inventário do Ciclo de Vida (ICV)

As Tabelas 46 e 47 apresentam os resultados das análises dos inventários da produção de 3,93 kg de argamassa com substituição parcial da areia por resíduo de corte e de polimento, mostrando os valores de entradas e saídas.

Tabela 46: Resultado da análise dos inventários da produção de 3,93kg de argamassas com e sem RI substituindo a areia

FLUXOS	QUANTIDADE				UNIDADE	FONTE DE DADOS
ENTRADAS						
Argamassa com R1:						
Materiais	0%	10%	20%	30%		
Cimento	0,81	0,81	0,81	0,81	kg	Banco de dados SICV Brasil
Areia	2,42	2,18	1,94	1,70	kg	Souza (2012)
Água	0,70	0,70	0,70	0,70	kg	Banco de dados ecoinvent
Resíduo*	0	0,24	0,48	0,72	kg	Castro, Gadioli, Wandermuren e Pazeto (2016)
Energia						
Eletricidade para a secagem do resíduo	0	0,08	0,16	0,24	kWh	Banco de dados SICV Brasil
SAÍDAS						
Principais						
Argamassa	3,93	3,93	3,93	3,93	kg	-
Resíduo a ser descartado (partículas maiores peneiradas)	0	0,02	0,03	0,05	kg	-
Emissões ao ar						
Vapor d'água da secagem do resíduo	0	0,11	0,21	0,32	kg	-

*Resíduo seco e peneirado

Fonte: a autora

Tabela 47: Resultado da análise dos inventários da produção de 3,93kg de argamassas com e sem R2 substituindo a areia

FLUXOS	QUANTIDADE				UNIDADE	FONTE DE DADOS
ENTRADAS						
Argamassa com R2:						
Materiais	0%	10%	20%	30%		
Cimento	0,81	0,81	0,81	0,81	Kg	Banco de dados SICV Brasil
Areia	2,42	2,18	1,94	1,70	Kg	Souza (2012)
Água	0,70	0,70	0,70	0,70	Kg	Banco de dadosecoinvent
Resíduo*	0	0,24	0,48	0,72	Kg	Castro, Gadioli, Wandermuren e Pazeto (2016)
Energia						
Eletricidade para a secagem do resíduo	0	0,12	0,23	0,35	kWh	Banco de dados SICV Brasil
SAÍDAS						
Principais						
Argamassa	3,93	3,93	3,93	3,93	kg	-
Resíduo a ser descartado (partículas maiores peneiradas)	0	0,15	0,29	0,44	kg	-
Emissões ao ar						
Vapor d'água da secagem do resíduo	0	0,12	0,25	0,37	kg	-

*Resíduo seco e peneirado

Fonte: a autora

A partir das Tabelas 46 e 47 percebe-se que quanto maior a quantidade de R1 e R2, maior a quantidade de energia necessária para a secagem dos resíduos. Em relação à quantidade de resíduos peneirados, o R1 teve 4,34% da sua massa inicial peneirada (a ser descartada) e o R2 teve 28,96%, as quais foram calculadas em kg e apresentadas nas Tabelas acima. Já em relação à quantidade de vapor d'água resultante das secagens dos resíduos, o R1 teve 29,46% da sua massa inicial transformada em vapor d'água e o R2 teve 24,22%, as quais também foram calculadas em kg e dispostas nas Tabelas.

As Tabelas 48 e 49 apresentam os resultados das análises dos inventários da produção de 3,93 kg de argamassa com substituição parcial do cimento por resíduo de corte e de polimento.

Tabela 48: Resultado da análise dos inventários da produção de 3,93kg de argamassas com e sem R1 substituindo o cimento

FLUXOS	QUANTIDADE				UNIDADE	FONTE DE DADOS
ENTRADAS						
Argamassa com R1:						
Materiais	0%	10%	20%	30%		
Cimento	0,81	0,73	0,65	0,57	kg	Banco de dados SICV Brasil
Areia	2,42	2,42	2,42	2,42	kg	Souza (2012)
Água	0,70	0,70	0,70	0,70	kg	Banco de dados ecoinvent
Resíduo*	0	0,08	0,16	0,24	kg	Castro, Gadioli, Wandermuren e Pazeto (2016)
Energia						
Eletricidade para a secagem do resíduo	0	0,025	0,05	0,075	kWh	Banco de dados SICV Brasil
SAÍDAS						
Principais						
Argamassa	3,93	3,93	3,93	3,93	kg	-
Resíduo a ser descartado (partículas maiores peneiradas)	0	0,006	0,012	0,018	kg	-
Emissões ao ar						
Vapor d'água da secagem do resíduo	0	0,03	0,07	0,1	kg	-

*Resíduo seco e peneirado

Fonte: a autora

Tabela 49: Resultado da análise dos inventários da produção de 3,93kg de argamassas com e sem R2 substituindo o cimento

FLUXOS	QUANTIDADE				UNIDADE	FONTE DE DADOS
ENTRADAS						
Argamassa com R2:						
Materiais	0%	10%	20%	30%		
Cimento	0,81	0,73	0,65	0,57	kg	Banco de dados SICV Brasil
Areia	2,42	2,42	2,42	2,42	kg	Souza (2012)
Água	0,70	0,70	0,70	0,70	kg	Banco de dados ecoinvent
Resíduo*	0	0,08	0,16	0,24	kg	Castro, Gadioli, Wandermuren e Pazeto (2016)

Energia						
Eletricidade para a secagem do resíduo	0	0,04	0,08	0,12	kWh	Banco de dados SICV Brasil
SAÍDAS						
Principais						
Argamassa	3,93	3,93	3,93	3,93	kg	-
Resíduo a ser descartado (partículas maiores peneiradas)	0	0,05	0,1	0,15	kg	-
Emissões ao ar						
Vapor d'água da secagem do resíduo	0	0,04	0,08	0,12	kg	-

*Resíduo seco e peneirado

Fonte: a autora

Devido à substituição do cimento ter sido feita em menores quantidades, percebe-se que a energia necessária para a secagem dos resíduos foi menor, comparada aos inventários das argamassas com substituição da areia. Além disso, as quantidades de resíduos peneirados e de vapor d'água também foram mais reduzidas com a substituição do cimento.

Os dados contidos nas Tabelas 46, 47, 48 e 49 foram utilizados para realizar-se a avaliação dos impactos do ciclo de vida.

5.4.2 Avaliação dos Impactos do Ciclo de Vida (AICV)

Os resultados referentes aos impactos potenciais para as argamassas com substituição parcial da areia, estão apresentados a seguir na Tabela 50. Percebe-se que quanto maior a quantidade de resíduos de corte (R1) e de polimento (R2), menores os impactos potenciais. De um modo geral, os valores dos impactos nos cenários com R1 e R2, para cada porcentagem, foram parecidos, tendo os cenários com R2 valores um pouco menores de impactos potenciais. Isto pode ter ocorrido devido às diferenças entre o ciclo de vida desses resíduos.

Tabela 50: Impactos potenciais em cada cenário – substituição da areia em 3,93kg de argamassa

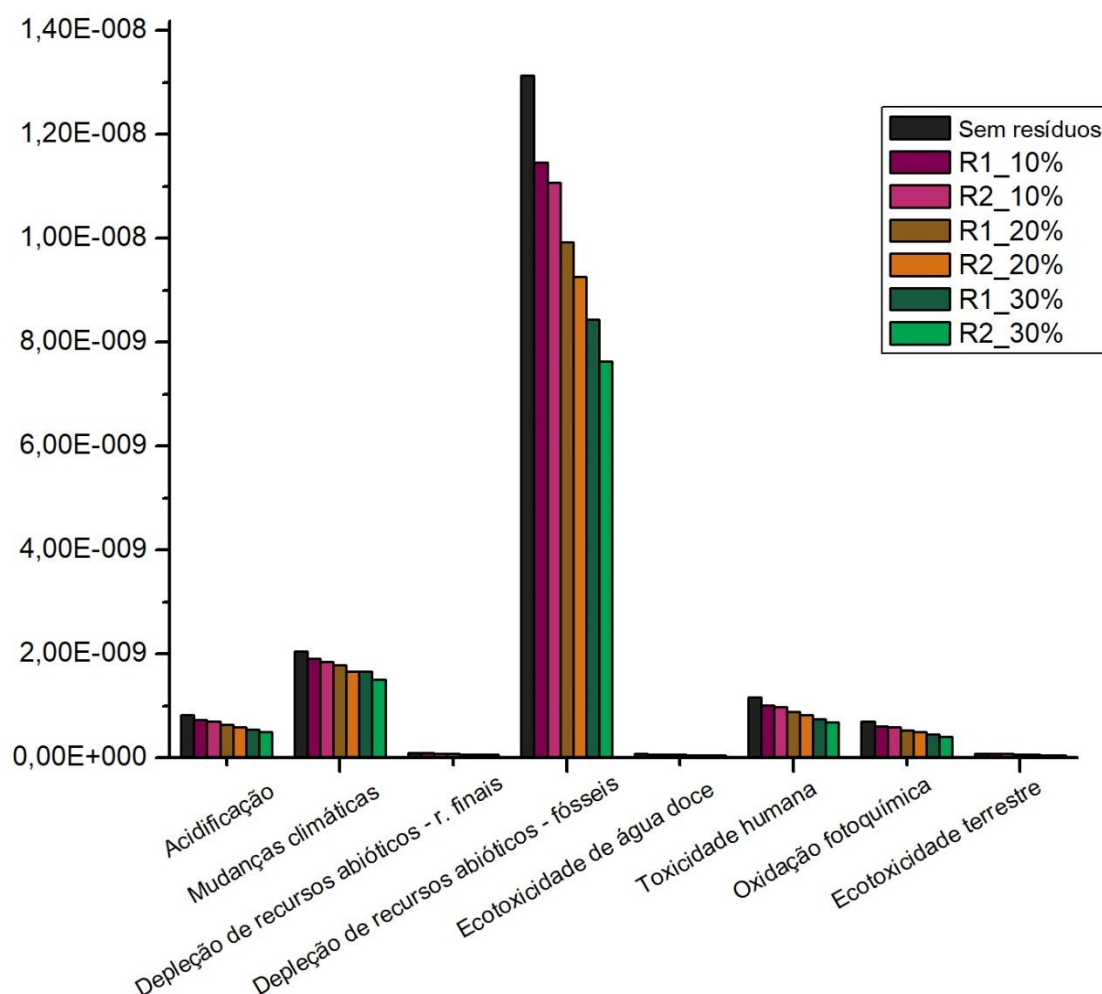
CI	Unidades	Sem resíduos	R1_10%	R2_10%	R1_20%	R2_20%	R1_30%	R2_30%
AC	kg SO2 eq.	1,98E-03	1,74E-03	1,69E-03	1,53E-03	1,43E-03	1,32E-03	1,20E-03
CC	kg CO2 eq.	8,60E-01	7,99E-01	7,72E-01	7,48E-01	6,98E-01	6,96E-01	6,30E-01
DAR	kg antimônio eq.	2,17E-07	1,89E-07	1,83E-07	1,64E-07	1,53E-07	1,39E-07	1,26E-07
DARF	MJ	4,99E+01	4,35E+01	4,21E+01	3,77E+01	3,52E+01	3,21E+01	2,90E+01
FAE	kg 1,4 dicloro-benzeno eq.	1,93E-03	1,68E-03	1,63E-03	1,46E-03	1,36E-03	1,24E-03	1,12E-03
HT	kg 1,4 dicloro-benzeno eq.	3,00E-02	2,62E-02	2,54E-02	2,28E-02	2,12E-02	1,94E-02	1,76E-02
PO	kg etileno eq.	2,60E-04	2,27E-04	2,19E-04	1,97E-04	1,83E-04	1,67E-04	1,52E-04
TE	kg 1,4 dicloro-benzeno eq.	9,57E-04	8,35E-04	8,07E-04	7,23E-04	6,75E-04	6,15E-04	5,57E-04

Fonte: a autora

Dentre as categorias analisadas, não houve nenhum impacto positivo ao meio ambiente. Percebe-se que, em todas as categorias, os maiores valores de impactos ambientais estão associados à argamassa sem resíduos e os menores valores de impactos às argamassas com 30% de R1 e 30% de R2. Percebe-se, ainda, que entre esses dois melhores cenários, o R2_30% gera menos impactos do que o R1_30%, em todas as categorias, mas essa diferença não é tão significativa.

Além disso, os resultados foram normalizados (Figura 43) a fim de obter-se uma melhor compreensão da magnitude dos impactos, correlacionando-se todas as categorias analisadas. Então, uma análise de sensibilidade foi realizada a partir da comparação do desempenho ambiental dos seis cenários de argamassas confeccionadas com os dois tipos de resíduos, em substituição parcial à areia, em porcentagens de 10, 20 e 30%, além do cenário sem os resíduos.

Figura 43: Análise de cenários com resultados normalizados – substituição da areia

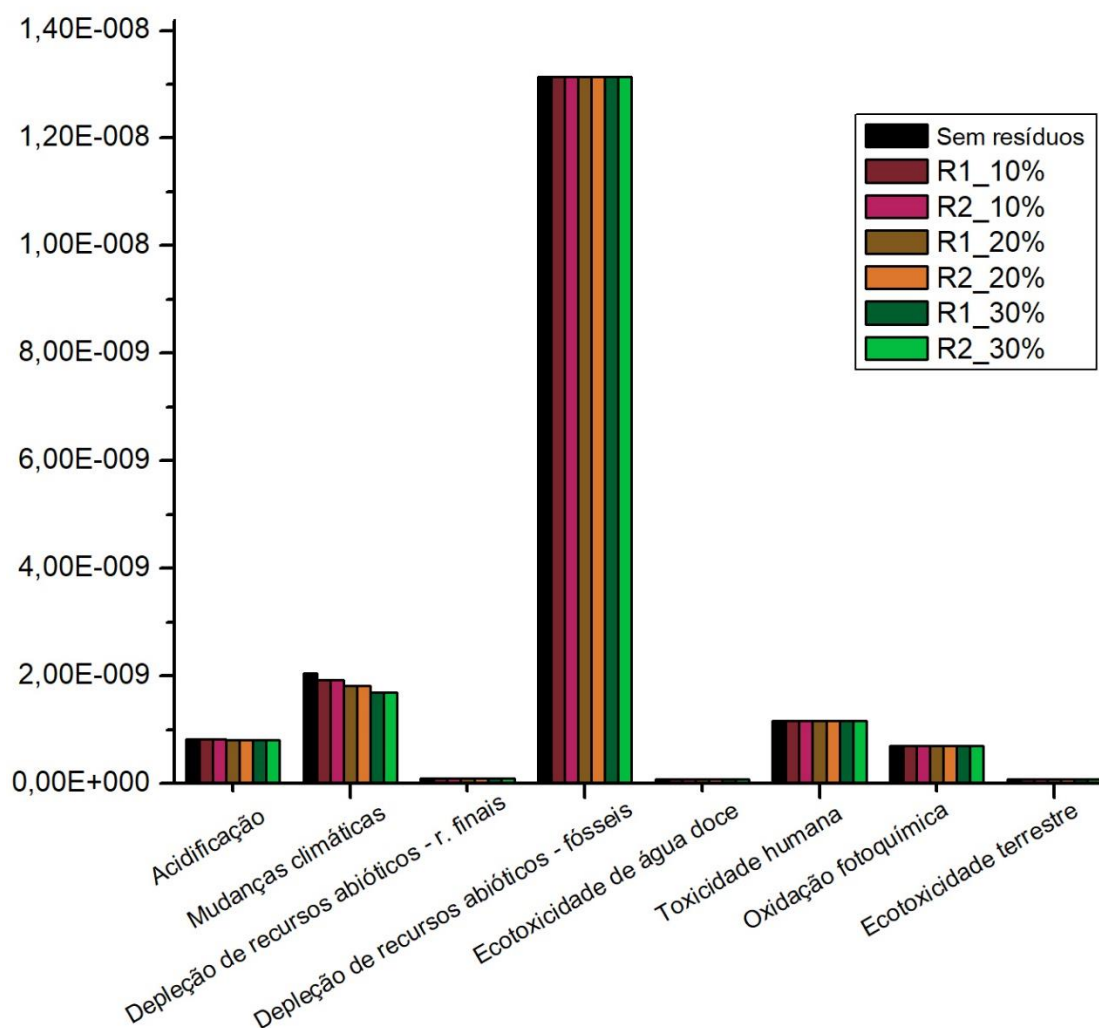


Fonte: a autora

Os maiores impactos ambientais estão vinculados à categoria de depleção dos recursos abióticos – combustíveis fósseis (DARF), seguida das categorias de mudanças climáticas (CC), toxicidade humana (HT), acidificação (AC) e oxidação fotoquímica (PO). Os valores de impactos das categorias de depleção de recursos abióticos – elementos, reservas finais (DAR), ecotoxicidade da água doce (FAE) e ecotoxicidade terrestre (TE) foram tão reduzidos, comparados aos demais, que estão quase imperceptíveis no gráfico.

A figura 44 mostra os resultados normalizados referentes aos impactos potenciais para as argamassas com substituição parcial do cimento.

Figura 44: Análise de cenários com resultados normalizados - substituição do cimento



Fonte: a autora

A partir da Figura 44 percebe-se que, com a substituição do cimento pelos resíduos, os impactos ambientais tiveram uma redução notável somente na categoria de Mudanças Climáticas. Portanto, como a substituição parcial da areia pelos resíduos reduziu os impactos ambientais potenciais em todas as categorias analisadas, ela pode ser considerada a opção ambientalmente mais favorável para a produção das argamassas do que a substituição do cimento.

5.4.3 Interpretação dos resultados

A partir da AICV (Tabela 50 e Figura 43), pode-se concluir que a substituição, em argamassa, da areia pelos resíduos de corte e polimento de chapas brutas de rochas

ornamentais, traz benefícios ambientais. O maior deles está relacionado à categoria de depleção dos recursos abióticos – combustíveis fósseis (DARF), na qual percebe-se a presença dos maiores valores de impacto e das maiores diferenças entre os cenários sem e com os resíduos. Os altos valores de impactos nesta categoria provavelmente estão relacionados aos processos de obtenção da areia (extração, processamento, armazenagem e transporte) que utilizam grandes quantidades de combustíveis fósseis, como indicou Souza (2012), e, ao substituir a areia pelos resíduos, os impactos nesta categoria reduziram-se. Além disso, esses impactos também podem estar associados à fabricação do cimento, a qual necessita de elevadas temperaturas em seus fornos de produção e por isso realiza a queima de grandes quantidades de combustíveis fósseis, sendo considerada assim, uma grande responsável pela emissão de CO₂ na atmosfera. (Milanez, 2007; Singh, Choudhary, Srivastava, Sangwan e Bhunia, 2017).

A segunda categoria de maior impacto foi a de mudanças climáticas (CC) e isto deve-se ao fato de que há consideráveis emissões de gases do efeito estufa, como CO₂ e CH₄, nos processos produtivos do cimento e da areia, como foi mencionado por Souza (2012) e Singh, Choudhary, Srivastava, Sangwan e Bhunia (2017). Assim, como na categoria DARF, quanto mais resíduos incorporados à argamassa para substituir a areia, menores os impactos ambientais potenciais.

A categoria de toxicidade humana (HT) foi a terceira com os maiores valores de impacto e ela deve englobar os impactos provenientes de substâncias tóxicas emitidas ao longo do processo de obtenção do cimento e da areia (MAURY; BLUMENSCHNEIN, 2012; SOUZA, 2012).

Em seguida, pode-se observar os valores dos impactos na categoria de acidificação (AC). Possivelmente, esses impactos associam-se à emissão de NO_x e SO_x, oriunda das cadeias produtivas do cimento e da areia (MAURY; BLUMENSCHNEIN, 2012; SOUZA, 2012). Desta forma, quanto menor a quantidade de areia nas argamassas, menores os impactos de acidificação. Ademais, de acordo com Silva (2012), a emissão de NO_x pode provocar também impactos como a oxidação fotoquímica (PO), outra categoria estudada neste trabalho, cujo impacto diminuiu conforme se aumentou a quantidade dos resíduos em relação à areia.

Finalmente, as categorias depleção dos recursos abióticos – elementos, reservas finais (DAR), ecotoxicidade terrestre (TE) e ecotoxicidade da água doce (FAE) apresentaram valores pouco significantes para esta pesquisa.

Comparando o comportamento das argamassas com substituição da areia e do cimento (Figura 44) nota-se que o mesmo perfil é observado: as categorias que apresentam os maiores impactos nas argamassas com substituição da areia são também as que apresentam os maiores impactos nas argamassas com substituição do cimento. Assim como os menores impactos estão apresentados nas mesmas categorias em ambas as substituições. A diferença entre a AICV das argamassas com substituição da areia e a AICV das argamassas com substituição do cimento foi em relação a maior redução dos impactos ambientais, em todas as categoriais, ao substituir-se a areia pelos resíduos.

Como limitações deste trabalho, pode-se mencionar a falta de um banco de dados com dados brasileiros, a falta de dados no software utilizado para a modelagem e a falta de dados específicos sobre o tratamento de resíduos de beneficiamento secundário, oriundos de marmorarias com o mesmo perfil da marmoraria onde os resíduos foram obtidos.

6 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com este estudo foi possível constatar que ambos os resíduos de beneficiamento secundário de rochas ornamentais, resíduos de corte e de polimento, têm potencial para uso em argamassas como agregados. Esses resíduos estão inseridos na mesma classificação (Classe II B – não perigosos e inertes) que os resíduos da construção civil, além de serem depositados no mesmo tipo de aterro, para materiais inertes. Devido a essas semelhanças e ao fato de que eles são resultantes do processamento de peças para acabamento das construções, apesar de serem produzidos em indústrias (marmorarias), eles podem ser considerados também resíduos da construção civil. Desta forma, eles podem ser utilizados para os mesmos fins que outros resíduos da construção, como matérias-primas para concretos e argamassas, etc. Além disso, ambos possuem composições químicas, massas específicas, teores de orgânicos, granulometrias, formatos dos grãos e cores similares, indicando que há grande semelhança entre eles. Esteticamente, suas cores não causaram significativas alterações nas pigmentações das argamassas, fundamental às edificações.

Uma desvantagem do resíduo de polimento em relação ao de corte é a quantidade de diversos outros resíduos misturados a ele: tampas de resinas e colas, embalagens, etc. Isso deve-se à cultura dos próprios funcionários da marmoraria, que descartam esses materiais no mesmo lugar onde o resíduo de polimento é descartado, pois têm conhecimento de que não haverá reciclagem dos mesmos. Se os resíduos das rochas dessa marmoraria fossem reciclados, talvez isso não ocorresse mais.

Ao incorporar os resíduos nas argamassas, separadamente, percebeu-se que as argamassas com 10% de ambos os resíduos e 20% de resíduo de polimento apresentaram índices de consistência mais elevados do que os recomendados pela NBR 16541 (ABNT, 2016b), o que implicaria em uma dificuldade de utilização das mesmas no estado fresco. Por isso, durante suas confecções seria necessário a redução da quantidade de água em suas composições. Já as argamassas com 30% dos dois tipos de resíduos apresentaram índices de consistência menores do que os recomendados pela norma, portanto, durante suas confecções haveria necessidade de um aumento na quantidade de água incorporada às misturas. Além disso, apesar dos dois tipos de resíduos possuírem partículas com formatos diferentes da areia e apresentarem faixas de granulometria menores, foram obtidos corpos de prova com densidades aparentes, absorção de água por imersão, índices de vazios, massas específicas seca e saturada e resistências mecânicas similares às argamassas sem os resíduos.

A maior diferença entre os resultados foi observada em relação à absorção de água por capilaridade. Todas as argamassas tiveram um aumento significativo de absorção por capilaridade ao incorporar os resíduos, exceto as argamassas com 20% e 30% de resíduo de polimento. Dentre essas duas, a argamassa com 30% de resíduo de polimento apresentou os menores valores de absorção, e, por isso, ela pode ser considerada as mais resistentes às intempéries, ou seja, a mais durável se utilizada como revestimento externo. Portanto, de uma forma geral o desempenho físico-mecânico das argamassas não foi consideravelmente afetado com a inserção dos resíduos.

A partir da ACV realizada, foi possível analisar o desempenho ambiental da produção das argamassas com substituição parcial de areia, em diferentes teores (0%, 10%, 20% e 30%), pelos resíduos de corte (R1) e polimento (R2) de chapas brutas de rochas ornamentais, gerados em marmorarias. Percebeu-se que, para todas as categorias de impacto, quanto maior a quantidade de R1 e R2 substituindo a areia, menores os impactos potenciais associados à produção de argamassas. Desta maneira, os melhores cenários, ou seja, os que obtiveram os menores impactos potenciais, foram o R1_30% e o R2_30%. Entre esses dois cenários, o R2_30% apresentou os impactos mais reduzidos, constatando-se com isto que, em termos ambientais, este é o cenário mais benéfico. Além disso, realizou-se também uma ACV de argamassas com substituição parcial do cimento em 0%, 10%, 20% e 30% pelos resíduos de corte e polimento e constatou-se que a substituição parcial da areia é mais ambientalmente favorável, pois traz uma maior redução dos impactos ambientais potenciais. Por isso, neste trabalho foram confeccionadas argamassas somente com a substituição da areia pelos dois tipos de resíduos.

Deste modo, conclui-se que a produção de argamassas com resíduos de beneficiamento secundário de rochas ornamentais é viável, tanto em relação ao desempenho físico-mecânico quanto ambiental, para uso em assentamento de tijolos de alvenaria e revestimento de tetos e paredes internas e externas (chapisco, emboço e reboco). A argamassa com 30% de resíduo de polimento obteve o melhor desempenho dentre todas as composições estudadas e portanto, acredita-se que ela seja a mais indicada para os usos citados. Entretanto, apesar dos resíduos terem potencial para substituírem as matérias-primas naturais, muitas empresas encontram-se em um círculo vicioso de atividades rotineiras, fechando-se para melhorias e inovações. Assim, seria dificultosa a tentativa de mudança da mentalidade dessas empresas para aceitarem a inserção de melhorias e tecnologias em seus processos ou inclusão de novos processos, no caso da indústria da construção, aceitar substituir parcialmente a areia pelos resíduos, e no caso da marmoraria, realizar o

beneficiamento dos mesmos. Porém, mesmo se as marmorarias não estivessem interessadas em realizar o beneficiamento de seus resíduos para transformá-los em coprodutos comercializáveis, haveria ainda a possibilidade de incentivo à criação de um novo mercado exclusivo para beneficiá-los, o que poderia gerar empregos e até favorecer à economia do país. Sendo assim, utilizar os resíduos de marmorarias como agregados para argamassas é possível, mas envolve todas as questões mencionadas anteriormente.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Realizar ensaios de teor de ar incorporado e retenção de água, nas argamassas frescas com 0%, 10%, 20% e 30% de resíduos de corte e polimento, para uma avaliação mais completa da trabalhabilidade dessas argamassas.

Realizar também ensaios de aderência à tração, a fim de testar a aderência ao substrato das argamassas com 0%, 10%, 20% e 30% de resíduos de corte e de polimento, verificando a capacidade de suportarem tensões sem se romperem.

Aplicar a argamassa na melhor condição (30% de resíduo de polimento) para avaliar seu efetivo desempenho em situação real.

Realizar a ACV econômica das argamassas com as diversas porcentagens de R1 e R2 e comparar com as argamassas sem resíduos.

Substituir a areia, em argamassas, por porcentagens superiores a 30% de resíduos de corte e polimento, avaliando a porcentagem máxima de substituição sem que haja alterações significativas nos desempenhos físicos-mecânicos das mesmas.

Aproveitar os cacos dos resíduos de corte e polimento em outros materiais como o concreto, a fim de não destinar nenhuma porcentagem dos resíduos aos aterros.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação.** Rio de Janeiro, 2009. 13p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7214: Areia normal para ensaio de cimento - Especificação.** Rio de Janeiro, 2015. 8p.

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

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.** Rio de Janeiro, 2005a. 8p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9935: Agregados – Terminologia.** Rio de Janeiro, 2011. 16p

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004: Resíduos sólidos - Classificação.** Rio de Janeiro, 2004. 77p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11172: Aglomerantes de origem mineral.** Rio de Janeiro, 1990. 5p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11578: Cimento Composto.** Rio de Janeiro, 1991. 5p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência.** Rio de Janeiro, 2016a. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão.** Rio de Janeiro, 2005b. 13p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13280: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido.** Rio de Janeiro, 2005c. 6p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13281: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos.** Rio de Janeiro, 2005d. 11p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13529: Revestimentos de paredes e tetos de argamassa inorgânicas – Terminologia.** Rio de Janeiro, 2013. 17p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15259: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade.** Rio de Janeiro, 2005e. 7p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16541: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura para realização dos ensaios.** Rio de Janeiro, 2016b. 6p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos.** Rio de Janeiro, 2018. 16p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura.** Rio de Janeiro, 2014a. 30p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14044: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações.** Rio de Janeiro, 2014b. 52p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248 – Agregados – Determinação da composição granulométrica,** 2003.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D3171 – Standard test methods for constituent content of composite materials,** 2015.

BAUTISTA-LAZO, S.; SHORT, T. Introducing the all seeing eye of business: a model for understanding the nature, impact and potential uses of waste. **Journal of Cleaner Production**, v. 40, p. 141-150, fev. 2013. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652612004763>>. Acesso em: 02 out. 2018.

BENACHOUR, Y.; DAVY, C. A.; SKOCZYLAS, F.; HOUARI, H. Effect of a high calcite filler addition upon microstructural, mechanical, shrinkage and transport properties of a mortar. **Cement and Concrete Research**, v. 38, p. 727-736, jun. 2008. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884608000513>>. Acesso em: 26 fev. 2019.

BON, A. M. T. **Exposição ocupacional à sílica e silicose entre trabalhadores de marmorarias, no município de São Paulo.** 2006. 323f. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo. Disponível em: <http://www.cplp.org/Files/Filer/MIC_IT/Ficheiros/Biblioteca/Teses/Exposicao_Ocupacio_nal_2.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2019.

BONAVETTI, V. L.; IRASSAR, E. F. The effect of stone dust content in sand. **Cement and Concrete Research**, v. 24, n. 3, p. 580-590, 1994. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0008884694901473>>. Acesso em: 10 set. 2018.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 Agosto de 2010**. Altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998. Brasília, DF, 18 maio 2012. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 28 jan. 2019

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações: fundamentos**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC Livros Técnicos e Científicos, 1988.

CARVALHO, J. D. N. Sobre as origens e desenvolvimento de concreto. **Revista Tecnológica**, v. 17, n. 1, p. 95-112, 2010. Disponível em: <<http://periodicos.uem.br/ojs/index.php/RevTecnol/article/view/8169>>. Acesso em: 28 set. 2018.

CASTRO, N. F.; GADIOLI, M. C. B.; WANDERMUREN, C. E. R.; PAZETO, A.A. Inventário do ciclo de vida das rochas ornamentais. In: SIMPÓSIO DE ROCHAS ORNAMENTAIS DO NORDESTE, 9, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: CETEM, 2016. p. 284-297. Disponível em: <<http://www.cetem.gov.br/images/congressos/2016/STRO604.pdf>>. Acesso em: 20 abr. 2018.

CELIK, M. Y.; SABAH, E. Geological and technical characterisation of Iscehisar (Afyon-Turkey) marble deposits and the impact of marble waste on environmental pollution. **Journal of environmental management**, v. 87, n. 1, p. 106-116, 2008.

CHEN, C.; HABERT, G.; BOUZIDI, Y.; JULLIEN, A.; VENTURA, A. LCA allocation procedure used as an incitative method for waste recycling: an application to mineral additions in concrete. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 54, n. 12, p. 1231-1240, 2010. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344910000935>>. Acesso em: 29 ago. 2018.

CHIODI FILHO, C. **O setor brasileiro de rochas ornamentais**. Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais – ABIROCHAS, Brasília, jul. 2018.

CINCOTTO, M. A. Reações de hidratação e pozolânicas. In: Isaia, G. **Concreto: ciência e tecnologia**. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, v.1, 2011.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução CONAMA nº 1, de 23 de janeiro de 1986**, 1986.

CORINALDESI, V.; MORICONI, G.; NAIK, T. Characterization of marble powder for its use in mortar and concrete. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 1, p. 113-117, 2010. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061809002529>>. Acesso em: 12 fev. 2018.

COSME, R. L.; TEIXEIRA, J. E. S. L.; CALMON, J. L. Use of frequency sweep and MSCR tests to characterize asphalt mastics containing ornamental stone residues and LD steel slag. **Construction and Building Materials** v.122, p.556-566, 2016.

COSTA NETO, P. L. O. **Estatística**. 2ª ed. Editora Edgard Blucher Ltda., 2002.

CURRAN, M. A. Life Cycle Assessment: a review of the methodology and its application to sustainability. **Current Opinion in Chemical Engineering**, v. 2, n. 3, p. 273-277, 2013. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211339813000221>>. Acesso em: 22 mar. 2018.

DÍAZ, C. **Estudo da possibilidade de uso da lama de esgoto e lama vermelha como matérias-primas cerâmicas**. 2013. 198f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde-15052014-162113/pt-br.php>>. Acesso em: 16 nov. 2017.

ELSEN, J. Microscopy of historic mortars—a review. **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 8, p. 1416-1424, 2006. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884605003145>>. Acesso em: 09 ago. 2018.

EUROPEAN COMMISSION. Joint Research Council. International Institute for Environment Sustainability. **International reference life cycle data system (ILCD) Handbook**. Luxembourg: European Commission. Joint Research Council. Institute for Environmental and Sustainability, 2010.

GALETAKIS, M.; SOULTANA, A. A review on the utilisation of quarry and ornamental stone industry fine by-products in the construction sector. **Construction and Building Materials**, v. 102, p. 769-781, 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061815306255>>. Acesso em: 23 out. 2017.

GAMEIRO, F.; BRITO, J.; SILVA, D. Durability performance of structural concrete containing fine aggregates from waste generated by marble quarrying industry. **Engineering Structures**, v. 59, p. 654-662, 2014. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029613005804>>. Acesso em: 26 jan. 2018.

GEISSDOERFER, M.; SAVAGET, P.; BOCKEN, N. M. P.; HULTINK, E. J. The Circular Economy—A new sustainability paradigm? **Journal of cleaner production**, v. 143, p. 757-768, 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652616321023>>. Acesso em: 22 mar. 2019

KELEŞTEMUR, O.; ARICI, E.; YILDIZ, S.; GÖKÇER, B. Performance evaluation of cement mortars containing marble dust and glass fiber exposed to high temperature by using Taguchi method. **Construction and Building Materials**, v. 60, p. 17-24, 2014. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061814002244>>. Acesso em: 28 fev. 2018.

LAMPREIA, N.; VEIGA, R. Argamassas cimentícias com resíduos industriais incorporados. **Materiais de Construção Sustentáveis**, v.1, p. 211-222, 2014.

LAPPONI, J. C. **Estatística usando o Excel**. 4^a ed. São Paulo: Elsevier Editora Ltda, 2005.

MÁRMOL, I.; BALLESTER, P.; CERRO, S.; MONRÓS, G.; MORALES, J.; SÁNCHEZ, L. Use of granite sludge wastes for the production of coloured cement-based mortars. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, n. 8, p. 617-622, 2010. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946510000867>>. Acesso em: 24 out. 2017.

MATTANA, A. J.; DE MEDEIROS, M. H. F.; DA SILVA, N. G.; DA COSTA, M. R. M. M. Análise hierárquica para escolha entre agregado natural e areia de britagem de rocha para confecção de argamassas de revestimento. **Ambiente Construído**, v. 12, n. 4, p. 63-79, 2012.

MAURY, M. B.; BLUMENSCHHEIN, R. N. Produção de cimento: Impactos à saúde e ao meio ambiente. **Sustentabilidade em Debate**, v. 3, n. 1, p. 75-96, jan/jun 2012.

MELLO, I. S. C.; CHIODI FILHO, C.; CHIODI, D. K. **Atlas de rochas ornamentais da Amazônia brasileira**. Serviço Geológico do Brasil, 2011. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/media/estante_virtual/atlas_rochas_ornamentais_AM.pdf>. Acesso em: 03 set. 2018.

MENDES, N. C.; BUENO, C.; OMETTO, A. R. Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: revisão dos principais métodos. **Production**, v. 26, n. 1, p. 160-175, mar. 2016. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/prod/2015nahead/0103-6513-prod-0103_6513_153213.pdf>. Acesso em: 11 set. 2018.

MILANEZ, Bruno. Co-incineração de resíduos industriais em fornos de cimento: problemas e desafios. **IX Encontro Nacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente**. Curitiba: Universidade Positivo, 2007.

MOURA, W.; GONÇALVES, J.; LEITE, R. Utilização do resíduo de corte de mármore e granito em argamassas de revestimento e confecção de lajotas para piso. **Sitientibus, Feira de Santana**, v. 26, n. 1, p. 49-61, 2002. Disponível em: <http://www2.uefs.br/sitientibus/pdf/26/utilizacao_do_residuo_de_corte_de_marmore.pdf>. Acesso em: 25 ago. 2017.

MOTA, J. D.; OLIVEIRA, D. F.; TRAJANO, M. F.; SANTIAGO, N. O.; SILVA, A. P. A. Aproveitamento dos resíduos de granito e caulim como materiais aditivos na produção de tijolos ecológicos. **Química dos Materiais**, v. 2, p. 31-37, jan/dez 2012.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto**. Editora Bookman, 441p., 2013.

PASSUELLO, A. C. B.; OLIVEIRA, A. F. de; COSTA, E. B. da; KIRCHHEIM, A. P. Aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida na Análise de Impactos Ambientais de Materiais de Construção Inovadores: estudo de caso da pegada de carbono de clínques alternativos. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 4, p. 7-20, out./dez. 2014.

PIMENTEL GOMES, F. **Curso de Estatística Experimental**, 12ª edição, 1987.

RANA, A.; KALLA, P.; VERMA, H. K.; MOHNOT, J. K. Recycling of dimensional stone waste in concrete: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 135, p. 312-331, 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652616308034>> Acesso em: 05 fev. 2019.

SAADE, M. R. M. **Modelagem de multifuncionalidade aplicada a ACV de cimentos e concretos**. 2017. 165f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. Disponível em: <<http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/322769>>. Acesso em: 04 jul. 2018.

SADEK, D. M.; EL-ATTAR, M. M.; ALI, H. A. Reusing of marble and granite powders in self-compacting concrete for sustainable development. **Journal of Cleaner Production**, v.121, p.19-32, 2016.

SALES, A. T. C.; SÁ, B. R. C.; SANTOS, D. G. Argamassas com substituição parcial do agregado miúdo por pó de mármore. In: ENCONTRO NACIONAL DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 15, 2014, Maceió. **Anais... ANTAC**, p. 2473- 2481, 2014. Disponível em: <http://www.infohab.org.br/entac2014/artigos/paper_235.pdf>. Acesso: 15 set. 2018.

SANTOS, G. R. S.; APOLINÁRIO, E. C. A.; RIBEIRO, D. V. Influência da adição do resíduo de corte de mármore e granito (RCMG) na reologia das argamassas. **Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 9, n. 1, 2013. Disponível em: <https://www.amigosdanatureza.org.br/publicacoes/index.php/forum_ambiental/article/view/596>. Acesso em: 08 dez. 2017.

SILVA, Diogo Aparecido Lopes. **Avaliação do ciclo de vida da produção do painel de madeira MDP no Brasil**. 2012. 207f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/88/88131/tde-31072012-121351/pt-br.php>>. Acesso em: 02 fev. 2018.

SILVEIRA, R. P.; CARMO, S. L. V.; DE PAULA, M. M.; DA PURIFICAÇÃO, L. S., DA HORA, H. R. M.; OLIVEIRA, V. P. S. Tratamento de efluentes da indústria de rochas ornamentais: uma abordagem bibliométrica. **ScientiaTec**, v. 4, n. 1, p. 42-59, 2017. Disponível em: <<https://periodicos.ifrs.edu.br/index.php/ScientiaTec/article/view/2227>>. Acesso em: 03 set. 2018.

SINGH, M.; ANSHUMAN, S.; DIPENDU, B. An investigation on effect of partial replacement of cement by waste marble slurry. **Construction and Building Materials**, V. 134, p. 471-488, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061816320736>. Acesso em: 10 jan. 2019.

SINGH, M.; CHOUDHARY, K., SRIVASTAVA, A., SANGWAN, K.; BHUNIA, D. A study on environmental and economic impacts of using waste marble powder in concrete. **Journal of Building Engineering**, v. 13, p. 87-95, 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710217301031>>. Acesso em: 16 ago. 2018.

SOARES, S. R.; SOUZA, D. M. de; PEREIRA, S. W. A avaliação do ciclo de vida no contexto da construção civil. **Coletânea Habitare**, v. 7, p. 96-127, 2006.

SOLTAN, A. M. M. et al. Lightweight aggregates from mixtures of granite wastes with clay. **Journal of Cleaner Production**, v.117, p.139-149, 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652616000354>>. Acesso em: 21 dez. 2018.

SOUZA, Ariane de. **Avaliação do ciclo de vida da areia em mineradora de pequeno porte, na região de São José do Rio Preto-SP** 2012. 121f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP. Disponível em: <<https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/4333>>. Acesso em: 01 fev. 2018.

TOLEDO, Rosane. **Técnicas fototérmicas e de raios-x para o monitoramento de sólidos e gases em materiais cerâmicos**. 2003. 324f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro-UENF, Rio de Janeiro, RJ. Disponível em <http://uenf.br/posgraduacao/engenharia-de-materiais/wp-content/uploads/sites/2/2013/07/LAMAV_2003_Doutorado_Rosane-Toledo.pdf>. Acesso em: 19 mar. 2019.

VARDHAN, K.; GOYAL, S.; SIDDIQUE, R.; SINGH, M. Mechanical properties and microstructural analysis of cement mortar incorporating marble powder as partial replacement of cement. **Construction and Building Materials**, v. 96, p. 615-621, 2015. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061815302646>>. Acesso em: 24 nov. 2017.

VIDAL, F. V.; AZEVEDO, H. C. A.; CASTRO, N. F. **Tecnologia de rochas ornamentais: pesquisa, lavra e beneficiamento**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2014. 700p.

ANEXO 1: Tabela para análise estatística

Valores da amplitude total estudentizada (q), para uso no teste de Tukey, ao nível de 95% de confiança.

n_2/n_1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	17,97	26,98	32,82	37,08	40,41	43,12	45,40	47,36	49,07	50,59	51,96	53,20	54,33	55,36	56,32	57,22	58,04	58,83	59,56
2	6,09	8,33	9,80	10,88	11,74	12,44	13,03	13,54	13,99	14,39	14,75	15,08	15,38	16,65	15,91	16,14	16,37	16,57	16,77
3	4,50	5,91	6,83	7,50	8,04	8,48	8,85	9,18	9,46	9,72	9,95	10,15	10,35	10,53	10,69	10,84	10,98	11,11	11,24
4	3,93	5,04	5,76	6,29	6,71	7,05	7,35	7,60	7,83	8,03	8,21	8,37	8,53	8,66	8,79	8,91	9,03	9,13	9,23
5	3,64	4,60	5,22	5,67	6,03	6,33	6,58	6,80	7,00	7,17	7,32	7,47	7,60	7,72	7,83	7,93	8,03	8,12	8,21
6	3,46	4,34	4,90	5,31	5,63	5,90	6,12	6,32	6,49	6,65	6,79	6,92	7,03	7,14	7,24	7,34	7,43	7,51	7,59
7	3,34	4,17	4,68	5,06	5,36	5,61	5,82	6,00	6,16	6,30	6,43	6,55	6,66	6,76	6,85	6,94	7,02	7,10	7,17
8	3,26	4,04	4,53	4,89	5,17	5,40	5,60	5,77	5,92	6,05	6,18	6,29	6,39	6,48	6,57	6,65	6,73	6,80	6,87
9	3,20	3,95	4,42	4,76	5,02	5,24	5,43	5,60	5,74	5,87	5,98	6,09	6,19	6,28	6,36	6,44	6,51	6,58	6,64
10	3,15	3,88	4,33	4,65	4,91	5,12	5,31	5,46	5,60	5,72	5,83	5,94	6,03	6,11	6,19	6,27	6,34	6,41	6,47
11	3,11	3,82	4,26	4,57	4,82	5,03	5,20	5,35	5,49	5,61	5,71	5,81	5,90	5,98	6,06	6,13	6,20	6,27	6,33
12	3,08	3,77	4,20	4,51	4,75	4,95	5,12	5,27	5,40	5,51	5,62	5,71	5,80	5,88	5,95	6,02	6,09	6,15	6,21
13	3,06	3,74	4,15	4,45	4,69	4,89	5,05	5,19	5,32	5,43	5,53	5,63	5,71	5,79	5,86	5,93	6,00	6,06	6,11
14	3,03	3,70	4,11	4,41	4,64	4,83	4,99	5,13	5,25	5,36	5,46	5,55	5,64	5,71	5,79	5,85	5,92	5,97	6,03
15	3,01	3,67	4,08	4,37	4,60	4,78	4,94	5,08	5,20	5,31	5,40	5,49	5,57	5,65	5,72	5,79	5,85	5,90	5,96
16	3,00	3,65	4,05	4,33	4,56	4,74	4,90	5,03	5,15	5,26	5,35	5,44	5,52	5,59	5,66	5,73	5,79	5,84	5,90
17	2,98	3,63	4,02	4,30	4,52	4,71	4,86	4,99	5,11	5,21	5,31	5,39	5,47	5,54	5,61	5,68	5,73	5,79	5,84
18	2,97	3,61	4,00	4,28	4,50	4,67	4,82	4,96	5,07	5,17	5,27	5,35	5,43	5,50	5,57	5,63	5,69	5,74	5,79
19	2,96	3,59	3,98	4,25	4,47	4,65	4,79	4,92	5,04	5,14	5,23	5,32	5,39	5,46	5,53	5,59	5,65	5,70	5,75
20	2,95	3,58	3,96	4,23	4,45	4,62	4,77	4,90	5,01	5,11	5,20	5,28	5,36	5,43	5,49	5,55	5,61	5,66	5,71
24	2,92	3,53	3,90	4,17	4,37	4,54	4,68	4,81	4,92	5,01	5,10	5,18	5,25	5,32	5,38	5,44	5,49	5,55	5,59
30	2,89	3,49	3,85	4,10	4,30	4,46	4,60	4,72	4,82	4,92	5,00	5,08	5,15	5,21	5,27	5,33	5,38	5,43	5,48
40	2,86	3,44	3,79	4,04	4,23	4,39	4,52	4,64	4,74	4,82	4,90	4,98	5,04	5,11	5,16	5,22	5,27	5,31	5,36
60	2,83	3,40	3,74	3,98	4,16	4,31	4,44	4,55	4,65	4,73	4,81	4,88	4,94	5,00	5,06	5,11	5,15	5,20	5,24
120	2,80	3,36	3,69	3,92	4,10	4,24	4,36	4,47	4,56	4,64	4,71	4,78	4,84	4,90	4,95	5,00	5,04	5,09	5,13
∞	2,77	3,31	3,63	3,86	4,03	4,17	4,29	4,39	4,47	4,55	4,62	4,69	4,74	4,80	4,85	4,89	4,93	4,97	5,01

Legenda: n_1 = número de tratamentos e n_2 = número de graus de liberdade do resíduo.

Fonte: Pimentel Gomes (1987)