



Universidade Estadual Paulista
"Júlio de Mesquita Filho"

Programa Interunidades

unesp 

Mestrado

Engenharia Civil e Ambiental

KARINA LEONETTI LOPES

**AVALIAÇÃO DE ARGAMASSA COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS
DE BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS**

Sorocaba
2020



KARINA LEONETTI LOPES

**AVALIAÇÃO DE ARGAMASSA COM INCORPORAÇÃO DE
RESÍDUOS DE BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS**

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 Silva



Sorocaba
2020

L864a	Lopes, Karina Leonetti Avaliação de argamassa com incorporação de resíduos de beneficiamento de rochas ornamentais / Karina Leonetti Lopes. -- Bauru, 2020 106 p. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Engenharia, Bauru Orientadora: Maria Lúcia Pereira Antunes Silva 1. Resíduos de beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO). 2. Argamassas. 3. Propriedades mecânicas. 4. Economia circular. I. Título.
-------	---

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Engenharia, Bauru. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

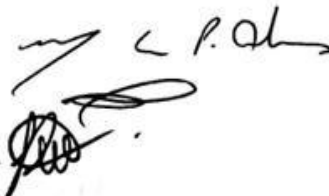
ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE Mestrado de KARINA LEONETTI LOPES, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 04 dias do mês de setembro do ano de 2020, às 14:00 horas, no(a) Via Sistema de videoconferência e outras ferramentas de comunicação a distância, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Profª. Drª. MARIA LUCIA PEREIRA ANTUNES SILVA - Orientador(a) do(a) Departamento de Engenharia Ambiental / Instituto de Ciência e Tecnologia, Câmpus de Sorocaba, Unesp, Prof. Dr. AFONSO RANGEL GARCEZ DE AZEVEDO do(a) Departamento de Engenharia Agrícola e Meio Ambiente / Universidade Federal Fluminense - UFF, Prof. Dr. LUIZ VERIANO OLIVEIRA DALLA VALENTINA do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / UDESC - Universidade do Estado de Santa Catarina - Joinville/SC, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE Mestrado de KARINA LEONETTI LOPES, intitulada **AVALIAÇÃO DE ARGAMASSA COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS**. 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.

Profª. Drª. MARIA LUCIA PEREIRA ANTUNES SILVA

Prof. Dr. AFONSO RANGEL GARCEZ DE AZEVEDO

Prof. Dr. LUIZ VERIANO OLIVEIRA DALLA VALENTINA



AGRADECIMENTOS

À professora e orientadora Maria Lúcia Pereira Antunes Silva, a qual sempre, sempre mesmo, se mostrou presente, capaz, dedicada e atenciosa a todo o desenvolvimento do trabalho. Agradeço de coração, ter tido a oportunidade de crescer academicamente e por todo o conhecimento que dividiu comigo. Muito obrigada pelo apoio em todos os momentos, orientações, carinho e, não posso deixar de ressaltar, o seu extremo bom humor, para lidar com tudo.

Ao professor e coordenador do programa de Engenharia Civil e Ambiental, Prof. Dr. Gustavo Henrique Ribeiro da Silva, por todo apoio ao projeto e, também aos funcionários da secretaria de pós-graduação.

Agradeço a UNESP pela existência do programa de Engenharia Civil e Ambiental, permitindo que se conclua esta importante etapa da minha vida.

Agradeço ao Centro Universitário FACENS, no nome do Prof. Dr. José Antônio de Milito, Profa. Dra. Sandra Bizarria Lopes Villanueva e Paulo Roberto Freitas de Carvalho que estiveram comigo facilitando todo o processo.

A colega Florence Rezende Leite, por ter me ajudado com os primeiros passos do trabalho, troca de informações e companheirismo para escrever artigos e participar de congressos.

Aos professores Sandro Donnini Mancini e Alexandre Marco da Silva, pelo conhecimento compartilhado, apoio e lições de vida.

Aos funcionários do Laboratório de Ensaio de Materiais (LEMAT) do Centro Universitário FACENS, por toda a ajuda nos desenvolvimentos dos ensaios, paciência, apoio, e até inúmeras risadas ao desenvolver as atividades. Não posso deixar de agradecer a Joyce, Matheus, Beatriz, Vinícius e Vivian.

As minhas amigas de profissão Aline Heloá de Souza Penido e Rosana Antônio, que sempre me incentivaram e me auxiliaram, dando energia para continuar.

Agradeço ao Caio Gomes, que por meio do Laboratório de Química do Centro Universitário Facens, colaborou de forma decisiva para a realização dos ensaios químicos deste trabalho.

Não posso deixar de citar os alunos Luiz, Pietro, Ana Carolina e Alexandre do Centro Universitário Facens e da UNESP que contribuíram como espectadores, preparando os resíduos ou questionando os ensaios, ou seja, de uma forma ou outra, estiveram colaborando.

Aos meus irmãos e cunhadas que me ajudaram, em diversos momentos, enfrentar as vicissitudes da vida.

E, finalmente, a minha mãe e filha, minhas “Angelinas”, que ao escrever este agradecimento, me falta palavras, tamanho é meu amor e gratidão por ter vocês em minha vida. São vocês que todo dia me fazem querer crescer e ser uma pessoa melhor, mais competente, mais eficiente, ou seja, vocês são a alegria da minha vida. E, “olha” que sou bem alegre!

“No meio da dificuldade encontra-se a oportunidade.”
Albert Einstein

Resumo

Largamente utilizada na indústria da construção civil, as rochas ornamentais apresentam relevante participação neste mercado devido suas diversas aplicações que remontam os primórdios das edificações da humanidade. Durante a etapa de beneficiamento das rochas ornamentais são geradas grandes quantidades de resíduos e estes muitas vezes são descartados de forma inadequada, podendo causar graves danos ambientais. Considerando o exposto, este trabalho apresenta a utilização de resíduos de beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO) como substitutos parciais do cimento Portland ou areia natural, em argamassas, com objetivo de promover a economia circular e permitir valorização dos resíduos como matéria-prima para a indústria da construção local. Foram utilizados três tipos de RBRO, sendo eles: proveniente do processo corte, proveniente do processo corte queimado a 500°C e do processo de polimento em marmoraria. Esses resíduos foram analisados por fluorescência de Raios X (FRX), difração de Raios X (DRX), e espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR). Foram confeccionados corpos-de-prova de argamassa com traço de 1:3 (cimento: areia), em massa, e substituição do cimento pelos resíduos em teores de 7,5%, 10% e 20%. Com esse mesmo traço (1:3) foram produzidas argamassas, com substituição de parte da areia, em massa, pelo RBRO proveniente do corte e do corte queimado, em teores de 7,5%, 10%, 20% e 30%. Os corpos de prova de argamassa, com substituição dos resíduos pelo cimento, aos 28 dias de cura, apresentam resultados que variaram entre: 3,6–4,9 MPa na resistência à tração na flexão; 7,8–14,6 MPa na resistência à compressão; 1918–1961 kg/m³ na densidade aparente; 12,5–13,5% na absorção de água; 23,5–25,5% no índice de vazios; 1,84–1,89 g/cm³ na massa específica seca e 2,08–2,13 g/cm³ na massa específica saturada. Os corpos de prova de argamassa, com substituição dos resíduos pelo areia apresentam resultados que variaram entre: 3,5–5,4MPa na resistência à tração na flexão; 10,9–14,1MPa na resistência à compressão; 1948–2032kg/m³ na densidade aparente; 12,5–13,8% na absorção de água; 23,5–25,5% no índice de vazios; 1,80–1,87 g/cm³ na massa específica seca e 2,04–2,13 g/cm³ na massa específica saturada. As análises da substituição dos resíduos dos três resíduos pelo cimento ou pela areia demonstraram grandes potencial de uso. Recomendando-se até 10% de substituição do cimento e até 30% de substituição da areia pelos resíduos de beneficiamento de rochas ornamentais.

Palavras-chave: Resíduos de beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO). Argamassas. Propriedades mecânicas. Economia circular.

Abstract

Largely used in the civil construction industry, the ornamental rocks present a relevant participation in this market due to its several applications that go back to the early days of mankind. During the step of the ornamental rock (natural rock) processing, a lot of waste is generated, and this waste is many times discarded inadequately, causing severe environmental damages. Taking this into consideration, this paper presents the use of ornamental rocks solid waste (ORSW) as partial substitute for Portland cement or sand, in mortars, with the objective of promoting the circular economy and allowing the recovery of waste as a raw material for the local construction industry. Three types of ORSW have been used, being: originating from the cut-off (cutting) process, the cut-off (cutting) process burnt at 500°C and from the polishing process in a marble factory (stone cutter). This waste has been analyzed by X-Ray Fluorescence (XRF) and X-Ray diffraction (XRD), and Fourier Transformed Infrared Spectroscopy (FTIR). Mortar specimen with trace of 1:3 (cement: sand) have been made, in mass, and substitution of the cement by the waste in content of 7,5%, 10% and 20%. With this same trace (1: 3) mortars were produced, replacing part of the sand, in mass, by the RBRO from the cut-off and the burnt cut-off, in contents of 7,5%, 10%, 20% and 30%. The mortar specimens, with replacement of the waste by cement at 28 days of curing, showed results ranging from 3,6–4,9 MPa in tensile strength in flexion; 7,8–14,6 MPa in compression resistance; 1918-1961 kg/m³ in bulk density; 12,5–13,5% in the absorption of water; 23,5-25,5% in the void index; 1,84-1,89g/cm³ in the specific dry mass and 2,08-2,13g/cm³ in the specific saturated mass. The mortar specimens, with substitution of the waste by the sand, presented results that range between 3,5-5,4MPa in the tensile strength in the bending; 10,9–14,1 MPa in the compression resistance; 1948–2032kg/m³ in the bulk density; 12,5–13,8% in the absorption of water; 23,5–25,5% at void index; 1,80–1,87 g/cm³ at dry specific mass and 2,04–2,13 g/cm³ at saturated specific mass. Analysis of the substitution of the waste of the three waste by cement or sand has shown great potential for use. Until 10% replacement of cement and until 30% replacement of sand with ornamental rocks solid waste is recommended.

Key words: Ornamental rocks solid waste (ORSW). Mortars. Mechanical properties. Circular economy.

Índice de Figuras

Figura 1 – Exemplo de construção utilizando rocha ornamental com função estrutural – Torre de Belém (Lisboa, Portugal – Conclusão da Construção no ano de 1520).....	7
Figura 2 – Exemplo da utilização moderna de rochas ornamentais buscando principalmente beleza arquitetônica para a edificação. (Casa em Tiradentes, MG) (a). Aplicação de rochas ornamentais em revestimentos (Projeto de Noura Van Dijk, Sala da Lareira, 2009)(b).....	7
Figura 3 – Imagem comparativa dos materiais utilizados para a confecção das argamassas	21
Figura 4 – Técnicas empregadas para caracterizar os materiais utilizados.....	21
Figura 5 – Moldagem dos corpos de prova de argamassa (fôrma de 40x40x160cm).	32
Figura 6 – Técnicas empregadas para caracterizar as argamassas no estado endurecido ...	33
Figura 7 – Corpo de prova de argamassa posicionado na prensa, após a ruptura	37
Figura 8 – Curva granulométrica da areia	42
Figura 9 – Comparação entre a solução-padrão e a solução obtida na determinação das impurezas orgânicas da areia	43
Figura 10 – Difratoograma de Raios X do cimento.....	46
Figura 11 – Difratoograma de Raios X da areia	47
Figura 12 – Difratoograma de Raios X do RBRO do processo de corte (RC)	48
Figura 13 – Difratoograma de Raios X do RBRO do processo de corte e queimado (RCQ)....	48
Figura 14 – Difratoograma de Raios X do RBRO do processo de polimento (RP)	49
Figura 15 – Resultado do ensaio de espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) do cimento.....	50
Figura 16 – Resultado do ensaio de Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) da areia	50
Figura 17 – Resultado do ensaio de Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) do RBRO do processo de corte.....	51
Figura 18 – Resultado do ensaio de Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) do RBRO do processo de corte e queimado.....	52
Figura 19 – Resultado do ensaio de Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) do RBRO do processo de polimento.....	52

Figura 20 – Resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão dos corpos de prova de argamassas, com substituição do cimento, por RBRO do processo de corte (misturas RC), em MPa.....	62
Figura 21 – Resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão dos corpos de prova de argamassas, com substituição do cimento, por RBRO do processo de corte – queimado (misturas RCQ), em MPa.....	62
Figura 22 – Resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão dos corpos de prova de argamassas, com substituição do cimento, por RBRO do processo de polimento (misturas RP), em MPa.....	63
Figura 23 – Resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão dos corpos de prova de argamassas, com substituição da areia por RBRO do processo de corte (misturas RCA), em MPa.....	64
Figura 24 – Resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão dos corpos de prova de argamassas, com substituição da areia por RBRO do processo de corte – queimado (misturas RCQA), em MPa	65
Figura 25 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão dos corpos de prova de argamassas, com substituição do cimento, por RBRO do processo de corte (misturas RC), em MPa.....	68
Figura 26 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão dos corpos de prova de argamassas, com substituição do cimento, por RBRO do processo de corte – queimado (misturas RCQ), em MPa.....	68
Figura 27 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão dos corpos de prova de argamassas, com substituição do cimento, por RBRO do processo de polimento (misturas RP), em MPa.....	69
Figura 28 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão dos corpos de prova de argamassas, com substituição da areia por RBRO do processo de corte (misturas RCA), em MPa.....	73
Figura 29 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão dos corpos de prova de argamassas, com substituição da areia por RBRO do processo de corte – queimado (misturas RCQA), em MPa	73

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Principais produtores mundiais de rochas ornamentais - 2014-2017, em milhões de toneladas.	8
Tabela 2 – Distribuição estadual da produção de rochas ornamentais no Brasil – 2019 .9	
Tabela 3 – Classificação das argamassas	15
Tabela 4 – Classificação segundo as suas funções na construção.....	15
Tabela 5 – Requisitos de resistência à compressão da norma NBR 13281 (ABNT, 2005).....	16
Tabela 6 – Requisitos de densidade de massa aparente no estado endurecido da norma NBR 13281 (ABNT, 2005).....	16
Tabela 7 – Requisitos de resistência à tração na flexão da norma NBR 13281 (ABNT, 2005).....	16
Tabela 8 – Requisitos de coeficiente de capilaridade da norma NBR 13281 (ABNT, 2005).....	17
Tabela 9 – Requisitos de densidade de massa no estado fresco da norma NBR 13281 (ABNT, 2005).....	17
Tabela 10 – Requisitos de retenção de água da norma NBR 13281 (ABNT, 2005)	17
Tabela 11 – Requisitos de resistência potencial de aderência à tração da norma NBR 13281 (ABNT, 2005)	17
Tabela 12 – Série de peneiras utilizadas nos ensaios de granulometria da areia	26
Tabela 13 – Quantidades, em massa, dos materiais utilizados nas misturas de argamassas com substituição parcial do cimento (teores indicados em %), pelo RBRO proveniente do processo de corte, corte queimado e de polimento (RC, RCQ e RP, respectivamente).....	30
Tabela 14 – Quantidades, em massa, dos materiais utilizados nas misturas de argamassas com substituição parcial da areia (teores indicados em %), pelo RBRO proveniente do processo de corte e corte queimado (misturas RCA e RCQA).	31
Tabela 15 – Dados do ensaio de granulometria da areia	42
Tabela 16 – Tabela comparativa com os resultados dos teores de elementos químicos dos RBROs, cimento e areia.....	44

Tabela 17 – Média e desvio padrão das densidades aparente das argamassas no estado endurecido, com substituição do cimento e da areia pelo RBRO (kg/m^3), aos 28 dias.	53
Tabela 18 – Análise de variância (ANOVA) das densidades aparente das argamassas no estado endurecido, com substituição do cimento pelo RBRO, misturas RC, RCQ e RP.	54
Tabela 19 – Análise de variância (ANOVA) das densidades aparente das argamassas no estado endurecido, com substituição da areia pelo RBRO, misturas RCA e RCQA.....	54
Tabela 20 – Média e desvio padrão dos resultados do ensaio de absorção de água, aos 28 dias de cura, das misturas de argamassas realizadas, em %.....	55
Tabela 21 – Análise de variância (ANOVA) da absorção de água das argamassas no estado endurecido, com substituição do cimento pelo RBRO, misturas RC, RCQ e RP.	55
Tabela 22 – Teste Tukey para os resultados da absorção de água das argamassas no estado endurecido, com substituição do cimento pelos RBROs para as misturas RC, RCQ e RP.....	55
Tabela 23 – Análise de variância (ANOVA) da absorção de água das argamassas no estado endurecido, com substituição da areia pelos RBROs, para as misturas RCA e RCQA.....	56
Tabela 24 – Média e desvio padrão dos resultados de índice de vazios, aos 28 dias de cura, das misturas de argamassas realizadas, em %.....	56
Tabela 25 – Análise de variância (ANOVA) do índice de vazios das argamassas no estado endurecido, com substituição do cimento pelo RBRO para as misturas RC, RCQ e RP.	57
Tabela 26 – Teste Tukey para os resultados do índice de vazios das argamassas no estado endurecido, com substituição do cimento pelo RBRO para as misturas RC, RCQ e RP.....	57
Tabela 27 – Análise de variância (ANOVA) do índice de vazios das argamassas no estado endurecido, com substituição da areia pelo RBRO para as misturas RCA.....	58
Tabela 28 – Teste Tukey para os resultados do índice de vazios das argamassas no estado endurecido, com substituição da areia pelo RBRO para as misturas RCA.	58
Tabela 29 – Análise de variância (ANOVA) do índice de vazios das argamassas no estado endurecido, com substituição da areia pelo RBRO para as misturas RCQA.	58
Tabela 30 – Média e desvio padrão dos resultados da massa específica seca, aos 28 dias de cura, das misturas de argamassas realizadas, em g/cm^3	59

Tabela 31 – Análise de variância (ANOVA) da massa específica seca das argamassas no estado endurecido, com substituição do cimento pelo RBRO para as misturas RC, RCQ e RP.....	59
Tabela 32 – Análise de variância (ANOVA) da massa específica seca das argamassas no estado endurecido, com substituição da areia pelo RBRO para as misturas RCA e RCQA.	59
Tabela 33 – Média e desvio padrão dos resultados da massa específica saturada, aos 28 dias de cura, das misturas de argamassas realizadas, em g/cm ³	60
Tabela 34 – Análise de variância (ANOVA) da massa específica saturada das argamassas no estado endurecido, com substituição do cimento pelo RBRO para as misturas RC, RCQ e RP.....	60
Tabela 35 – Análise de variância (ANOVA) da massa específica seca das argamassas no estado endurecido, com substituição da areia pelo RBRO para as misturas RCA e RCQA.	60
Tabela 36 – Análise de variância (ANOVA) dos ensaios de resistência à tração na flexão dos corpos de prova de argamassas, com substituição do cimento pelo RBRO (misturas RC, RCQ e RP).....	63
Tabela 37 – Análise de variância (ANOVA) dos ensaios de resistência à tração na flexão dos corpos de prova de argamassas, com substituição da areia pelo resíduo de corte, misturas RCA.	65
Tabela 38 – Análise de variância (ANOVA) dos ensaios de resistência à tração na flexão dos corpos de prova de argamassas, com substituição da areia pelo resíduos de corte queimado, misturas RCQA.	66
Tabela 39 – Teste Tukey para os resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão dos corpos de prova de argamassas, com substituição da areia pelo resíduos de corte queimado, misturas RCQA.	66
Tabela 40 – Análise de variância (ANOVA) dos ensaios de resistência à compressão dos corpos de prova de argamassas, com substituição do cimento pelo resíduo de corte, misturas RC.	69
Tabela 41 – Teste Tukey para os resultados dos ensaios de resistência à compressão dos corpos de prova de argamassas, com substituição do cimento pelo resíduo de corte, misturas RC.	70

Tabela 42 – Análise de variância (ANOVA) dos ensaios de resistência à compressão dos corpos de prova de argamassas, com substituição do cimento pelo resíduo de corte queimado, misturas RCQ.	70
Tabela 43 – Teste Tukey para os resultados dos ensaios de resistência à compressão dos corpos de prova de argamassas, com substituição do cimento pelo resíduo de corte queimado, misturas RCQ.	71
Tabela 44 – Análise de variância (ANOVA) dos ensaios de resistência à compressão dos corpos de prova de argamassas, com substituição do cimento pelo resíduo de polimento, misturas RP.	71
Tabela 45 – Teste Tukey para os resultados dos ensaios de resistência à compressão dos corpos de prova de argamassas, com substituição do cimento pelo resíduo de polimento, misturas RP.	72
Tabela 46 – Análise de variância (ANOVA) dos ensaios de resistência à compressão dos corpos de prova de argamassas, com substituição da areia pelo resíduo de corte, misturas RCA.	74
Tabela 47 – Análise de variância (ANOVA) dos ensaios de resistência à compressão dos corpos de prova de argamassas, com substituição da areia pelo resíduo de corte queimado, misturas RCQA.	74
Tabela 48 – Teste Tukey para os resultados dos ensaios de resistência à compressão dos corpos de prova de argamassas, com substituição da areia pelo resíduo de corte queimado, misturas RCQA.	75
Tabela 49 – Classificação das misturas de argamassa, com substituição do cimento e da areia pelo RBRO, segundo a NBR 13281 (ABNT, 2005).	76

Lista de siglas e abreviaturas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
RBRO	Resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais
FTIR	Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier
FRX.....	Fluorescência de Raios X
DRX	Difração por Raios X
RC	RBRO proveniente do processo de corte das rochas, in natura
RCQ	RBRO proveniente do processo de corte e queimado
RP	RBRO proveniente do processo de polimento das rochas, in natura

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS	3
2.1	Objetivo Geral	3
2.2	Objetivos específicos.....	3
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3.1	Reaproveitamento de Resíduos na Indústria da Construção Civil	5
3.2	Rochas Ornamentais e a Produção Brasileira.....	6
3.3	Resíduos de Beneficiamento de Rochas Ornamentais (RBRO)	9
3.3.1	<i>Classificação Ambiental do RBRO</i>	<i>10</i>
3.3.2	<i>Aplicação do RBRO em argamassas e concretos</i>	<i>11</i>
3.4	Argamassas	13
3.4.1	<i>Breve histórico</i>	<i>13</i>
3.4.2	<i>Definições</i>	<i>14</i>
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	18
4.1	Materiais empregados na confecção das argamassas	18
4.1.1	<i>Cimento Portland.....</i>	<i>18</i>
4.1.2	<i>Areia.....</i>	<i>19</i>
4.1.3	<i>Água.....</i>	<i>19</i>
4.1.4	<i>Resíduos de beneficiamento de rochas ornamentais.....</i>	<i>19</i>
4.2	Caracterização físico-química dos materiais empregados na confecção das argamassas.....	21
4.2.1	<i>Caracterização da massa específica dos materiais.....</i>	<i>22</i>
4.2.2	<i>Determinação da massa unitária</i>	<i>24</i>
4.2.3	<i>Análise granulometria por peneiramento</i>	<i>25</i>
4.2.4	<i>Caracterização por determinação de impurezas orgânicas</i>	<i>26</i>
4.2.5	<i>Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem (material pulverulento).....</i>	<i>27</i>
4.2.6	<i>Análises por fluorescência de Raios X (FRX)</i>	<i>28</i>
4.2.7	<i>Análise por Difração por Raios-X (DRX).....</i>	<i>28</i>
4.2.8	<i>Análises de espectroscopia no Infravermelho (FTIR)</i>	<i>29</i>
4.3	Métodos para a preparação das misturas das argamassas.....	29

4.4	Caracterização da argamassa no estado endurecido	32
4.4.1	<i>Técnicas empregadas para a caracterização das argamassas no estado endurecido</i>	33
4.4.2	<i>Densidade aparente das argamassas no estado endurecido</i>	33
4.4.3	<i>Absorção de água, índice de vazios e massa específica para argamassas</i>	34
4.4.4	<i>Resistência à tração na flexão das argamassas</i>	36
4.4.5	<i>Resistência à compressão das argamassas</i>	38
4.4.6	<i>Análise estatística dos resultados</i>	38
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
5.1	Caracterização dos materiais para a produção das argamassas.....	41
5.1.1	<i>Resultados da caracterização por massa específica</i>	41
5.1.2	<i>Resultados dos ensaios para determinação da massa unitária</i>	41
5.1.3	<i>Resultados da análise granulometria</i>	41
5.1.4	<i>Determinação de impurezas orgânicas</i>	43
5.1.5	<i>Resultados da determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem (material pulverulento)</i>	43
5.1.6	<i>Resultados das análises de fluorescência de Raios X</i>	44
5.1.7	<i>Resultados dos ensaios de difração por Raios X (DRX)</i>	45
5.1.8	<i>Resultados dos ensaios de espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)</i>	49
5.2	Caracterização das argamassas no estado endurecido	53
5.2.1	<i>Densidade aparente no estado endurecido das argamassas</i>	53
5.2.2	<i>Resultados da determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica das argamassas</i>	54
5.2.3	<i>Resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão das argamassas</i>	61
5.2.4	<i>Resultados dos ensaios de resistência à compressão das argamassas</i>	67
5.2.5	<i>Classificação das argamassas segundo os ensaios de densidade aparente, resistências à tração na flexão e à compressão</i>	76
6	CONCLUSÕES E OUTRAS CONSIDERAÇÕES	77
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	79
8	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	80
1	Cimento Portland.....	87
1.1	Definição.....	87
1.2	Composição Química	87
1.3	Tipos de cimento Portland.....	88

1 INTRODUÇÃO

Na construção civil, o uso dos recursos naturais se faz necessário para as produções dos diversos insumos que dão origem as edificações e a infraestrutura tão necessárias para o desenvolvimento da sociedade. Desta forma, o crescimento da população mundial e o seu progresso tem estado atrelado a severos impactos ambientais ao planeta. Como exemplo, pode-se citar a produção de cimento, que segundo levantamento da Cement Sustainability Initiative (2018) são liberados aproximadamente 832 quilogramas de CO₂ na atmosfera por tonelada de clínquer produzido. Os esforços desta indústria no mundo mostram uma redução significativa de 19,2% de CO₂ liberado na atmosfera por tonelada de cimento produzido desde 1990. Vale destacar que em 2018 a emissão causada pela produção de cimento, atingiu cerca de 553 milhões de toneladas de CO₂ liberadas para a atmosfera.

Fatos como estes têm estimulado a busca de materiais alternativos tecnicamente adequados às finalidades construtivas, visando a substituição de materiais naturais e, portanto, prolongando assim o ciclo de vida de alguns materiais (D'AGOSTINO & SOARES, 2003).

Historicamente o modelo de produção predominante é linear, ou seja, extrai-se a matéria prima, e após o uso do produto gerado, os resíduos são descartados como lixo. O modelo chamado de economia circular apresenta o fechamento dos processos produtivos lineares, com a reinserção dos resíduos dentro de processos produtivos (FOSTER et. al, 2016).

A indústria da construção civil se apresenta como uma grande fonte geradora de resíduos mas é, por outro lado, uma das indústrias que apresentam a maior oportunidade de aplicação de resíduos em várias de suas atividades, a citar: produção de cimento, concretos, argamassas, produtos de origem cerâmica etc., sobretudo na economia local, promovendo a economia circular e permitindo valorização dos resíduos.

Dentro deste conceito de economia circular, são estudados diversos materiais alternativos a serem utilizados na indústria da construção civil, um deles são os resíduos de beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO). De acordo com o Ministério de Minas e Energia (BRASIL, 2009), um dos principais desafios do setor de mineração de rochas ornamentais é o aproveitamento dos rejeitos oriundos da lavra e do beneficiamento destes minerais, uma vez que são gerados em grande quantidade.

Segundo Montani (2018) a produção mundial de rochas ornamentais e de revestimento foi de 152 milhões de toneladas (Mt) no ano de 2017. Estimava-se que no ano 2020, a produção

mundial de rochas ornamentais ultrapassaria a casa das 150 Mt, mas isto ocorreu em 2017. No Brasil, em 2019, a produção foi de 9,2 Mt/ano (ABIROCHAS, 2019).

Existem 6100 marmorarias/serrarias, no Brasil, sendo que a maioria atende exclusivamente o mercado interno, representando mais de 60% das empresas do setor (ABIROCHAS, 2018). Segundo Campos et. al. (2013) nas serrarias, o resíduo gerado é da ordem de 40% do volume do bloco processado.

Desta forma, trabalhar em soluções de materiais para construção civil que permitam a proteção, conservação e prolongamento dos recursos naturais, a redução da poluição do ar e das águas, a economia de energia, e o aumento da vida útil dos aterros sanitários são fundamentais para o desenvolvimento da sociedade.

Considerando o exposto, este trabalho teve como principal motivação o aproveitamento de resíduos de beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO) como matérias-primas para produção de misturas a base de cimento Portland, tais como argamassas de revestimento, argamassas de assentamento e concretos. Assim esse trabalho estuda a substituição de parte do cimento e da areia, pelo resíduo de rochas ornamentais, gerados em marmorarias localizadas nas cidades, na produção de argamassas.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho da substituição parcial do cimento Portland e da areia por resíduos do beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO) em argamassa. Verificando como essa substituição pode contribuir para o desempenho mecânico deste material.

Neste trabalho pretende-se investigar as seguintes hipóteses:

- Hipótese 1: a substituição parcial do cimento Portland pelos RBRO não trará prejuízo ao desempenho mecânico das argamassas.
- Hipótese 2: a substituição parcial da areia pelos RBRO não trará prejuízo ao desempenho mecânico das argamassas.
- Hipótese 3: as argamassas produzidas com as substituições de cimento e areia pelos RBROs atendem aos requisitos de densidade, resistência à tração na flexão e resistência à compressão da norma NBR 13281 (ABNT, 2005), podendo mostrar o seu potencial para a aplicação em obras, valorizando o uso destes resíduos e, portanto, evitando localmente os prejuízos ambientais oriundos do descarte inadequado dos RBROs.

2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar os resíduos de beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO) oriundo do processo de corte, de polimento e o resíduo de corte queimado a 500°C e o cimento quanto às composições químicas elementares, utilizando a fluorescência de Raios X (FRX), sua mineralogia utilizando a técnica de difração de Raios X (DRX) e os componentes das ligações químicas destes materiais através do ensaio de espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR);
- Caracterizar a areia quanto a presença de impureza orgânica, quanto a sua massa específica, massa unitária, granulometria e a porcentagem de material fino que passa através da peneira 75 µm por lavagem (material pulverulento),

composições químicas elementares, utilizando a fluorescência de Raios X (FRX), sua mineralogia utilizando a técnica de difração de Raios X (DRX) e os componentes das ligações químicas destes materiais através do ensaio de espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR);

- Produzir corpos-de-prova de argamassas com traço 1:3 (cimento:areia), substituindo o cimento, em massa, por três tipos RBRO (oriundos do processo corte, corte queimado e de polimento) em diferentes teores (0%-referência, 7,5%, 10%, 20%) e substituindo a areia, em massa, pelo RBRO (oriundos do processo de corte e de corte queimado) nos teores (0%-referência, 7,5%, 10%, 20% e 30%) e avaliar o seu desempenho mecânico através de ensaios de resistência à tração na flexão e à compressão;
- Avaliar outras propriedades das argamassas no estado endurecido, produzidas com os diferentes RBROs em teores de substituição do cimento e da areia. São elas: densidade aparente, absorção de água, índice de vazios, massa específica seca e massa específica saturada.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Reaproveitamento de Resíduos na Indústria da Construção Civil

No Brasil foram geradas, no ano de 2018, cerca de 79 milhões de toneladas de resíduos sólidos. Estima-se que 40,5% destes resíduos foram para lixões ou aterros, que não contam com um conjunto de sistemas e medidas necessários para proteger a saúde e o meio ambiente contra danos e degradações (ABRELPE, 2019). São coletados pelos serviços de limpeza dos municípios brasileiros cerca de 45 milhões de toneladas de resíduos de construção e demolição (RCD), tais como: tijolos, concreto, argamassa, madeira, aço, telhas, azulejos, cal, gesso etc. Assim, pelo menos 57% dos resíduos sólidos gerados são oriundos da construção civil, já que estes dados indicam apenas os materiais abandonados em logradouros públicos (ABRELPE, 2019).

O reuso e a reciclagem são alternativas vantajosas no gerenciamento de resíduos sólidos, já que promovem a recuperação de um material que seria descartado, diminui o impacto da extração das matérias-primas não renováveis, aumenta a vida útil de aterros e evita disposições irregulares de resíduos (ANGULO, 2005).

Assim, diferente do processo produtivo linear, utilizar os resíduos como componentes para a produção de novos produtos, promove a chamada economia circular, ou seja, baseado no conceito “reduzir, reutilizar e reciclar”, o resíduo pode ser considerado matéria prima para novos produtos tecnológicos, com redução de gasto energético (LETT, 2014). Pesquisar soluções, principalmente, de reaproveitamento dos resíduos, na própria indústria, torna-se uma questão imperativa para garantir a sustentabilidade ambiental do planeta.

Resíduos e subprodutos metalúrgicos, da mineração, agrícolas e florestais, municipais e urbanos, e de outros setores industriais são amplamente estudados para a aplicação na construção civil. Para os resíduos provenientes da indústria de rochas ornamentais (setor de beneficiamento de mármore e granito), observa-se a predominância de aplicações em materiais cimentícios (concretos e argamassas) (ISAIA, 2007).

3.2 Rochas Ornamentais e a Produção Brasileira

As rochas ornamentais são materiais rochosos extraídos e beneficiados e podem ser utilizados com funções de revestimento, decorativas ou estruturais.

A utilização de rochas surgiu com a construção de cúpulas funerárias e templos religiosos, devido a sua durabilidade. A partir do século XIX, com a revolução industrial, a rocha passou a ser menos utilizada, devido à introdução do concreto e o metal nas construções. No século XX, a evolução da tecnologia permitiu a elaboração de chapas de pedra para revestimento (VIDAL et. al., 2013).

No Brasil as rochas foram introduzidas como materiais da construção civil na época colonial, pelos portugueses, que elaboravam fortificações ao longo da costa e edificações religiosas. Embora o país tivesse inúmeras pedreiras, as pedras tinham de ser importadas, o mármore, por exemplo, é uma delas. Apenas nos anos de 1915 que surgiram os primeiros registros de pedreiras com produção de mármore, deste modo, estados como Minas Gerais e Rio de Janeiro tomaram destaque na produção de mármore nesta época (VIDAL et. al., 2013).

As rochas ornamentais são submetidas a diversas solicitações físicas, químicas e mecânicas, desde o momento de sua extração dos maciços rochosos. Sendo as etapas de beneficiamento: beneficiamento primário (extração e serragem) e final (resinagem, polimento e corte) (ABIROCHAS, 2018(a)).

Largamente utilizada na indústria da construção civil, as rochas ornamentais apresentam relevante participação neste mercado devido suas diversas aplicações que remontam os primórdios das edificações da humanidade. Por se tratar de um material natural e abundante no planeta, sua aplicação já teve extraordinária importância como elementos construtivos de função estrutural, como em construções na idade média (Figura 1), assumindo utilizações mais modernas buscando, por exemplo, elegância arquitetônica para as edificação (Figura 2a) ou como revestimentos de piso e parede (Figura 2b), entre outras diversas aplicações.

Figura 1 – Exemplo de construção utilizando rocha ornamental com função estrutural – Torre de Belém (Lisboa, Portugal – Conclusão da Construção no ano de 1520)



Fonte: HistoriaDePortugal.info, 2011

Figura 2 – Exemplo da utilização moderna de rochas ornamentais buscando principalmente beleza arquitetônica para a edificação. (Casa em Tiradentes, MG) (a). Aplicação de rochas ornamentais em revestimentos (Projeto de Noura Van Dijk, Sala da Lareira, 2009)(b).



Fonte: Raitzik, 2012(a), Rosso, 2010(b).

Segundo a Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais (ABIROCHAS), em 2019, a produção do Brasil foi estimada 9,2 milhões de toneladas (Mt) de rochas ornamentais brutas e processadas, no Brasil, superando em 10% os 8,3Mt de 2017 (Tabela 1). O cenário mundial do setor tem apresentado crescimento desde a década de 1920, aproximadamente 1,8Mt/ano.

Montani (2018) descreve em relatório do ano de 2018, que o Brasil foi caracterizado por uma prevalência da oferta para exportação de suas rochas brutas. Sendo que o principal mercado, o chinês, se destina 64,5% do volume de negócios. A Itália é o segundo destino de exportação das rochas brutas. Já as rochas processadas, tem como principal destino os Estados Unidos, sendo esse responsável pela aquisição de mais de quatro quintos das vendas, seguido pelo México, Canadá e Colômbia, indicando claramente que a exportação de artefatos de rochas ornamentais brasileiros é quase exclusivo dos mercados americanos.

Nos últimos anos o Brasil tem se posicionado entre a quarta ou quinta economia mundial na produção de rochas ornamentais, embora a capacidade produtiva seja muito menor

comparativamente aos primeiro e segundo lugar desta classificação, conforme a Tabela 1 (ABIROCHAS, 2019).

Tabela 1 – Principais produtores mundiais de rochas ornamentais - 2014-2017, em milhões de toneladas.

Países X Ano (Peso)	2014		2015		2016		2017	
	Mt	%	Mt	%	Mt	%	Mt	%
China	42,5	31,1	45,0	32,1	46,0	31,7	49,0	32,2
Índia	20,0	14,7	21,0	15,0	23,5	16,2	24,5	16,1
Turquia	11,5	8,4	10,5	7,5	10,75	7,4	12,3	8,1
Irã	7,0	5,1	7,5	5,4	8,0	5,5	8,7	5,7
Brasil	8,75	6,4	8,2	5,9	8,5	5,9	8,3	5,4
Itália	6,75	4,9	6,5	4,6	6,25	4,3	6,3	4,1
Egito	4,2	3,1	5,0	3,5	5,25	3,6	5,3	3,5
Espanha	4,85	3,6	4,75	3,4	5,0	3,4	4,9	3,2
EUA	2,65	1,9	2,7	1,9	2,8	1,9	2,8	1,8
Portugal	2,75	2,0	2,7	1,9	2,6	1,8	2,8	1,8
França	1,2	0,9	1,25	0,9	1,3	0,9	1,4	0,9
Arábia Saudita	1,3	1,0	1,2	0,9	1,25	0,9	1,3	0,8
Grécia	1,3	1,0	1,25	0,9	1,2	0,8	1,5	1,0
Paquistão	1,0	0,7	1,05	0,7	1,1	0,7	1,2	0,8
Subtotal	115,75	84,8	118,6	84,6	123,5	85,1	130,3	85,7
Outros	20,8	15,2	21,4	15,7	21,5	15,0	21,7	14,3
Total	136,5	100	140,0	100	145,0	100	152,0	100

Fonte: ABIROCHAS, 2019.

São considerados como rochosos naturais, para ornamentação e revestimento: granitos, pegmatitos e várias outras rochas silicáticas, além de mármore, travertinos, ardósias, quartzitos maciços e foliados, basaltos e gabros, serpentinitos, pedra sabão e pedra-talco, calcários, metaconglomerados polimíticos e oligomíticos, cherts, arenitos, xistos diversos etc.

São mais de 1.200 variedades e rochas comercializadas em negócios internos e externos, oriundos de pelo menos 1.500 frentes ativas de lavra, sempre a céu aberto e quase sempre em maciços (ABIROCHAS, 2018(b)).

A Tabela 2 apresenta dados de 2017 da produção brasileira de rochas ornamentais por estado do Brasil. Nota-se que o estado do Espírito Santo é o maior produtor de rochas ornamentais do país com cerca de 32,6% da produção, seguido pelo estado de Minas Gerais com cerca de 19,6%.

Tabela 2 – *Distribuição estadual da produção de rochas ornamentais no Brasil – 2019*

Região	UF	Produção (t)	Tipo de Rocha
Sudeste	Espírito Santo	3. 000.000	Granito e mármore
	Minas Gerais	1.800.000	Granito, pegmatito, ardósia, quartzito, foliado, quartzito maciço, pedra-sabão, pedra-talco, serpentinito, mármore e basalto
	Rio de Janeiro	200.000	Granito, mármore e pedra Paduana (gnaisse)
	São Paulo	80.000	Granito, quartzito foliado
Sul	Paraná	200.000	Granito e mármore
	Rio Grande do Sul	140.000	Granito, basalto e quartzito
	Santa Catarina	120.000	Granito, ardósia e mármore
Centro-Oeste	Goiás	200.000	Granito, quartzito foliado, serpentinito
	Mato Grosso	50.000	Granito
	Mato Grosso do Sul	60.000	Granito e mármore
Nordeste	Bahia	1.200.000	Granito, pegmatito, mármore, travertino, arenito e quartzito maciço
	Ceará	1. 000.000	Granito, pegmatito, limestones e pedra Cariri (calcário plaqueado)
	Paraíba	460.000	Granito e conglomerado
	Pernambuco	150.000	Granito e quartzito
	Alagoas	160.000	Granito
	Rio Grande do Norte	200.000	Mármore e granito
	Piauí	100.000	Pedra Morisca (arenito arcossiano) e ardósia
Norte	Rondônia	20.000	Granito
	Roraima	20.000	Granito e anortosito
	Pará	30.000	Granito
	Tocantins	10.000	Granito, chert (quartzito), serpentinito
Total Brasil		9.200.000	

Fonte: ABIROCHAS, 2019.

3.3 Resíduos de Beneficiamento de Rochas Ornamentais (RBRO)

Diversos processos industriais são fontes geradoras de resíduos sólidos, com grande potencial de reciclagem como os materiais de construção. Dentre estes processos encontra-se o beneficiamento de rochas ornamentais (GONÇALVES, 2000).

O beneficiamento das rochas ornamentais pode ser separado em duas etapas: beneficiamento primário ou beneficiamento secundário (final). O beneficiamento primário consiste nas etapas de corte dos blocos de rochas extraídos do maciço, de maneira a obter

chapas, nas condições mais próxima do produto acabado. Já o beneficiamento secundário ou final, realizado nas marmorarias/serrarias, envolve o corte e tratamento superficial (polimento) das chapas, para se obter diversos produtos, como: painéis de revestimento externo, ladrilhos para revestimento, degraus, mesas, bancadas, rodapés, molduras, colunas e produtos especiais, destinado ao consumidor final (VIDAL et. al., 2013).

O processo de beneficiamento primário, se inicia com a lavra ou extração das rochas ornamentais e produção de blocos retangulares em várias extensões, a partir dos maciços e de acordo, com a melhor aplicação para as demais fases de beneficiamento da rocha, ou seja, nesta etapa do processo busca-se obter a condição do material de melhor viabilidade econômica. Os equipamentos responsáveis por dar forma aos blocos são denominados teares, sendo os mais comuns nesta indústria, os com laminas metálicas, que fazem uso de uma lama acrescida de cal e granalha de aço para a realização dos cortes, permitindo a lubrificação e o resfriamento das lâminas de corte; a lama permite ainda, evitar a oxidação das lâminas, facilitar o corte por ser abrasiva e contribuir para a limpeza do equipamento, entre outras funções. Os teares com fios diamantados também são muito utilizados e, neste caso, emprega-se uma lama (polpa abrasiva) composta de rocha moída e água (REIS & ALVAREZ, 2007). Quando a lama se torna viscosa, após recircular pelo sistema, torna-se um resíduo do processo de beneficiamento primário (ALIABDO, 2014).

Como mencionado anteriormente, segundo Vidal et. al. (2013) foi no século XX, com o avanço da tecnologia, que os blocos retangulares, passaram a ser produzidos em chapas de pedra para revestimento, sendo até hoje, a principal utilização das rochas ornamentais. Essas chapas passam pelo o beneficiamento final, nas marmorarias e durante essa etapa, são produzidos resíduos finos na forma de lama, contendo insumos do processo de corte e polimento, tais como: cal, granalha, resina etc. (VIDAL et. al., 2013). São os resíduos de corte e polimento do beneficiamento final das rochas ornamentais que serão estudados nesse trabalho.

3.3.1 Classificação Ambiental do RBRO

Os resíduos de beneficiamento de rochas ornamentais foram classificados por Gonçalves, Moura e Molin (2002) como Classe II A, não perigosos e não inertes, de acordo com a classificação dos resíduos sólidos da norma NBR 10004 (ABNT, 2004). Dessa forma, eles não são considerados resíduos inflamáveis, reativos, corrosivos, tóxicos e nem patogênicos, podendo ser, portanto, reciclados como matérias-primas de materiais de construção.

“As lamas de beneficiamento de rochas ornamentais são resíduos que apresentam composição química variada em função da composição das rochas, do processo de beneficiamento, dos processos de reaproveitamento de águas e lamas, das propriedades dos insumos, entre outros fatores” (BRAGA, 2010). Ainda, segundo BRAGA (2010) em nota técnica, caracterizou as lamas de desdobramento e polimento de mármore e granitos, segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004) como Classe II A.

3.3.2 Aplicação do RBRO em argamassas e concretos

São diversos os estudos e utilizações dos resíduos provenientes da exploração e beneficiamento de rochas ornamentais, tais como na produção de: argamassas, tijolos de solo-cimento, bloco de concreto para pavimentação, blocos de concretos estruturais e não estruturais, concretos etc. (ISAIA, 2007).

Denominado como resíduo de corte de granito (RCG) e classificado por Gonçalves, Moura e Molin (2002), como um resíduo Classe II A – não inerte, fez-se a adição do material aos concretos, nas frações de 10% e 20% de RCG em relação a massa de cimento. Identificou-se o incremento das resistências à compressão axial em todas as misturas, com vários valores de a/c (relação água/cimento) e todos as frações de adição do RCG. A mistura com teor de 10% da adição, apresentou o melhor desempenho quanto a resistência à compressão.

Segundo Alves (2008) o resíduo de rochas graníticas não foi considerado um material pozolânico em seu estudo, mas ressalta que o resíduo pode atuar como efeito fíler. O fíler é uma adição mineral (fina) e sem atividade química, que é capaz de melhorar o desempenho de concretos e argamassas já que sua ação física promove o empacotamento granulométrico e a potencial formação de pontos nucleação para a hidratação dos grãos de cimento (ISAIA, 2011).

Mashaly (2016) No que diz respeito às pastas de compósitos de cimento, o lodo de mármore foi substituído por ligante de cimento até 40% em certas proporções de 0%, 10%, 20%, 30% e 40%. As propriedades mineralógicas, físicas e mecânicas das pastas de compósitos de cimento fresco e endurecido e das misturas de concreto endurecido, incluindo o lodo de mármore, foram determinadas em 3, 7 e 28 dias de cura para compósitos de cimento e 28 d para produtos de concreto. Os resultados mostraram que o uso de até 20% de lodo de mármore melhorou as propriedades físicas e mecânicas dos produtos de concreto.

Estudos comparativos de pastas e argamassas sem e com RBRO em substituição a 20% do cimento Portland, foram realizados em Melo (2016) que após a caracterização dos resíduos, avaliou o desempenho de pastas e argamassas no estado fresco e endurecido. Os resultados

indicaram que os compostos cimentícios se tornaram mais susceptível à carbonatação e menos resistente ao esforço de compressão, e suas propriedades no estado fresco não foram afetadas, assim como a resistividade elétrica e a absorção de água por imersão e por capilaridade.

Estudos realizados por Li (2018) mostra resultados que revelaram que a adição de pó de granito como substituição de pasta de cimento em argamassas pode melhorar substancialmente a carbonatação e resistências à água, reduzem a tensão e a taxa de encolhimento finais e, ao mesmo tempo, reduzir a teor de cimento em até 25%.

Em Camargos (2018) avaliou-se, a viabilidade da substituição da areia nas quatro frações especificadas pela NBR 7215 (ABNT, 1996) pelos resíduos de corte de rochas ornamentais, na fabricação de argamassas, com misturas com substituição de 100% da areia, pelo RBRO. Obteve-se, para a análise da resistência à compressão, resultados similares entre as misturas de referência e as misturas com as substituições.

Teores de 10% e 20% de granito moído como substituição parcial do cimento Portland, foram aplicados em Campos (2018) para a confecção de misturas de concreto, resultando em concretos com desempenho superior ao concreto de referência na maior parte dos ensaios efetuados, atribuindo maior resistência mecânica, redução da absorção de água e índices de vazios. Observou-se ainda, que concretos produzidos com substituição parcial de cimento alcançaram melhores resultados comparados aos com adição e, portanto, são mais economicamente viáveis, pois permitiram a obtenção de concretos com menor consumo de cimento.

Teixeira et. al (2018), caracterizou mineralogicamente um RBRO de uma empresa que faz cortes de mármore e granitos na região de Pelotas/RS, por meio dos ensaios de difração de raios X (DRX) e microanálise de raios X (EDX). Fisicamente caracterizou o RBRO por ensaios de granulometria à laser e massa específica. Neste trabalho, produziu-se misturas com teores de 5%, 7,5%, 10% e 12,5% de substituição em massa ao cimento Portland – CPV-ARI. Os resultados dos ensaios de resistência à compressão foram avaliados estatisticamente por análise de variância (ANOVA) e comparação múltipla de médias (Teste de Tukey), recomendando a probabilidade da substituição de até 7,5% do cimento, pelo RBRO, na fabricação de concretos.

Em Farias et. al (2018) ressalta-se que a porosidade na zona de transição do concreto pode ser um fator significativo de influência na sua resistência mecânica. Desta forma, foram estudados concretos com 100% de brita granítica (concreto convencional) e 100% de agregado reciclado, sendo ambos, com adição nos teores de 0% (referência), 5% e 10% do resíduo de corte de mármore e granito (RCMG). Como variáveis de resposta a resistência foram feitos os

ensaios de resistências à compressão axial, tração na flexão e módulo de elasticidade. Houve acréscimo satisfatório nos traços de concreto convencional para as resistências à compressão axial e tração na flexão. Para o concreto com agregado reciclado, os ensaios revelaram também acréscimo de resistência com 5% de adição do RCMG, tanto para a resistência à compressão, quanto para tração na flexão. Os resultados de módulo elasticidade não apresentaram mudanças significativas.

Sudarshan et. al. (2019) afirma que ao utilizar o pó de mármore como substituto de 10% do cimento, não observou nenhum impacto adverso nas propriedades do concreto ou argamassas. Por outro lado, a substituição de agregados miúdos e graúdos por resíduos de mármore pode ser feito entre 50% e 75% dependendo da origem geológica do agregado e sua distribuição granulométrica.

3.4 Argamassas

Neste item são apresentados um breve histórico e definições das argamassas para que se possa embasar as discussões deste trabalho.

3.4.1 Breve histórico

A mais de 11.000 anos as argamassas de cal são empregadas na construção civil, ou seja, desde a pré-história. O registro mais antigo da utilização de argamassas, foi descoberto em 1985 e tratava-se de um piso de 180 m², no sul da Galiléia, próximo de Yiftah'el, em Israel, estima-se ter sido produzido entre 7.000 a.C. e 9.000 a.C. Uma outra aplicação da argamassa de cal, foi uma laje de 25 cm de espessura, produzida na Iugoslávia (Vila de Lepenske-Vir), que se estima ter sido realizado a 5.600 a. C. e, então, muitos outros registros foram descobertos em obras dos romanos, etruscos, gregos e egípcios. Com o passar dos anos e com as mudanças das técnicas construtivas outros materiais foram sendo incorporados as argamassas, principalmente o cimento Portland. Importante mencionar que nos dias de hoje o emprego das argamassas industrializadas vem crescendo nos canteiros de obra, uma vez que há maior garantia de qualidade do material e basta a aplicação da água no momento de uso (ISAIA, 2007).

3.4.2 Definições

A Norma Brasileira NBR 7200 (ABNT, 1998) define a argamassa como sendo a mistura de aglomerantes e agregados com água, tendo capacidade de aderência e endurecimento. Outros componentes podem ser adicionados as argamassas com a finalidade de imprimir melhor as suas propriedades, a se citar: aditivos e/ou adições.

As argamassas são comumente utilizadas para se realizar os assentamentos de tijolos/blocos ou como reboco/acabamento. Desta forma, denomina-se argamassa de assentamento e argamassa de reboco, ou ainda, argamassa de revestimento.

Bertolini (2010), ressalta que as argamassas de assentamento devem apresentar trabalhabilidade e coesão, permitindo a aplicação confortável nas peças de alvenaria (blocos e tijolos) e garantindo as acomodações das variações dimensionais das peças pela influência dos intemperismos. Além disto as argamassas de assentamento devem resistir adequadamente aos esforços impostos a alvenaria e as ações da água e do meio ambiente.

Quanto as argamassas de reboco (revestimento), Bertolini (2010), enfatiza que a função principal deste material é formar uma camada superficial de proteção ambiental, higiênica e estética das peças da alvenaria. Vale destacar que as exigências são distintas para argamassas de reboco interno ou externo a edificação. No caso das argamassas internas, é preponderante os atributos: estéticos, de higiene e segurança. Já no caso das argamassas externas espera-se a proteção aos agentes agressivos do meio ambiente.

Segundo Isaia (2007), apresenta-se, na Tabela 3, a classificação das argamassas segundo vários critérios e, suas funções, são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 3 – *Classificação das argamassas*

Critério de classificação	Tipo
Quanto à natureza do aglomerante	• Argamassa aérea • Argamassa hidráulica
Quanto ao tipo de aglomerante	• Argamassa de cal • Argamassa de cimento • Argamassa de cimento e cal • Argamassa de gesso • Argamassa de cal e gesso
Quanto ao número de aglomerantes	• Argamassa simples • Argamassa mista
Quanto à consistência da argamassa	• Argamassa seca • Argamassa plástica • Argamassa fluida
Quanto à plasticidade da argamassa	• Argamassa pobre ou magra • Argamassa média ou cheia • Argamassa rica ou gorda
Quanto à densidade de massa da argamassa	• Argamassa leve
	• Argamassa normal
	• Argamassa pesada
Quanto à forma de preparo ou fornecimento	• Argamassa preparada em obra
	• Mistura semipronta para argamassa
	• Argamassa industrializada
	• Argamassa dosada em central

Fonte: ISAIA (2007, p. 865)

Tabela 4 – *Classificação segundo as suas funções na construção*

Função	Tipos
Para construção de alvenarias	Argamassa de assentamento (elevação da alvenaria)
	Argamassa de fixação (ou encunhamento) – alv. de vedação
Para revestimento de paredes e tetos	Argamassa de chapisco
	Argamassa de emboço
	Argamassa de reboco
	Argamassa de camada única
	Argamassa para revestimento decorativo monocamada
Para revestimento de pisos	Argamassa de contrapiso
	Argamassa de alta resistência para piso
Para revestimentos cerâmicos (paredes/ pisos)	Argamassa de assentamento de peças cerâmicas – colante
	Argamassa de rejuntamento
Para recuperação de estruturas	Argamassa de reparo

Fonte: ISAIA (2007, p. 865)

Conforme a NBR 13281 (ABNT, 2005), que apresenta os requisitos das argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos, pode-se classificar as argamassas conforme as Tabelas 5 a 11.

Tabela 5 – *Requisitos de resistência à compressão da norma NBR 13281 (ABNT, 2005)*

Classe	Resistência à compressão MPa	Método de Ensaio
P1	2,0	ABNT NBR 13279
P2	1,5 a 3,0	
P3	2,5 a 4,5	
P4	4,0 a 6,5	
P5	5,5 a 9,0	
P6	8,0	

Fonte: NBR 13281 (ABNT, 2005)

Tabela 6 – *Requisitos de densidade de massa aparente no estado endurecido da norma NBR 13281 (ABNT, 2005)*

Classe	Densidade de massa aparente no estado endurecido kg/m ³	Método de Ensaio
M1	1200,0	ABNT NBR 13280
M2	1000 a 1400	
M3	1200 a 1600	
M4	1400 a 1800	
M5	1600 a 2000	
M6	1800,0	

Fonte: NBR 13281 (ABNT, 2005)

Tabela 7 – *Requisitos de resistência à tração na flexão da norma NBR 13281 (ABNT, 2005)*

Classe	Resistência à tração na flexão MPa	Método de Ensaio
R1	1,5	ABNT NBR 13279
R2	1,0 a 2,0	
R3	1,5 a 2,7	
R4	2,0 a 3,5	
R5	2,7 a 4,5	
R6	3,5	

Fonte: NBR 13281 (ABNT, 2005)

Tabela 8 – *Requisitos de coeficiente de capilaridade da norma NBR 13281 (ABNT, 2005)*

Classe	Coeficiente de capilaridade g/dm ² .min ^{1/2}	Método de Ensaio
C1	1,5	ABNT NBR 15259
C2	1,0 a 2,5	
C3	2,0 a 4,0	
C4	3,0 a 7,0	
C5	5,0 a 12,0	
C6	10,0	

Fonte: NBR 13281 (ABNT, 2005)

Tabela 9 – *Requisitos de densidade de massa no estado fresco da norma NBR 13281 (ABNT, 2005)*

Classe	Densidade de massa no estado fresco kgm	Método de Ensaio
D1	1400	ABNT NBR 13278
D2	1200 a 1600	
D3	1400 a 1800	
D4	1600 a 2000	
D5	1800 a 2200	
D6	2000	

Fonte: NBR 13281 (ABNT, 2005)

Tabela 10 – *Requisitos de retenção de água norma NBR 13281 (ABNT, 2005)*

Classe	Retenção de água %	Método de Ensaio
U1	78,0	ABNT NBR 13277
U2	72 a 85	
U3	80 a 90	
U4	86 a 94	
U5	91 a 97	
U6	95 a 100	

Fonte: NBR 13281 (ABNT, 2005)

Tabela 11 – *Requisitos de resistência potencial de aderência à tração da norma NBR 13281 (ABNT, 2005)*

Classe	Resistência potencial de aderência à tração MPa	Método de Ensaio
A1	0,20	ABNT NBR 15258
A2	0,20	
A3	0,30	

Fonte: NBR 13281 (ABNT, 2005)

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais empregados na confecção das argamassas

Neste item, serão descritos os materiais utilizados para se confeccionar as argamassas.

Importante ressaltar que segundo a NBR 13281 (ABNT, 2005) define-se argamassa com uma mistura homogênea de agregados(s) miúdos(s), aglomerantes(s) inorgânicos(s) e água contendo ou não aditivos ou adições. Neste trabalho utilizou-se a argamassa de cimento Portland, produzida com cimento, areia, água e substituição parcial do cimento ou da areia por RBRO.

4.1.1 *Cimento Portland*

O aglomerante empregado neste trabalho foi o cimento Portland CP II F-32 (Cimento Portland Composto com Material Carbonático), fabricado pelo grupo Votorantim Cimentos, ou seja, da marca Votoran. O cimento foi comprado em lojas de materiais de construção na cidade de Sorocaba-SP, cuja composição é descrita pela norma NBR 16697 (ABNT, 2018).

O cimento utilizado, foi caracterizado neste trabalho quanto a sua composição química (através da técnica de fluorescência de Raios X (FRX)), a sua mineralogia (através da técnica de difração de Raios X (DRX)) e quanto aos grupos funcionais das moléculas que o compõe (através da espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)). Essas técnicas e procedimentos experimentais serão descritas no item 4.2.

Por ser o cimento Portland um material já intensamente estudado, neste trabalho é apresentado no **Apêndice A** uma revisão bibliográfica, com suas principais características. Desta maneira, busca-se apresentar apenas as informações acerca deste material, necessárias para a análise dos resultados deste trabalho.

Segundo NBR 16697 (ABNT, 2018) o CP II F-32 tem em sua composição de 11 a 25% (porcentagem em massa) de adição de material carbonático e não é o mais indicado para aplicação em meios muito agressivos. Trata-se do tipo de cimento Portland mais utilizado no Brasil, conforme apresentado na Tabela A3, o que justifica seu emprego neste trabalho. A massa específica do cimento segundo o fabricante é de $(3,0 \pm 0,2) \text{ g/cm}^3$.

4.1.2 Areia

O agregado miúdo usado na confecção das argamassas foi uma areia de granulometria fina segundo os requisitos da NBR 7211 (ABNT, 2009). A areia foi adquirida em um porto de areia de grande porte da região de Sorocaba-SP e é um material comercializado na região. A areia é classificada quanto a sua origem como um agregado natural, ou seja, agregados encontrados na natureza já preparados para o uso sem a necessidade de qualquer outro beneficiamento que não seja a lavagem (ISAIA, 2011).

A areia utilizada, foi caracterizada neste trabalho, quanto a sua massa específica, massa unitária e granulometria, quanto a presença de impureza orgânica e a porcentagem de material fino que passa através da peneira 75 µm por lavagem (material pulverulento). Com exceção dos ensaios de massas específica e unitária, que são considerados ensaios especiais segundo a NBR 7211 (ABNT, 2009), os demais parâmetros citados acima são considerados mínimos para se especificar um agregado para concreto. Desta forma, adotou-se os parâmetros desta norma neste trabalho para qualificar a areia utilizada na confecção das argamassas.

A areia também foi caracterizada quanto a sua composição química (através da FRX), a sua mineralogia (através da DRX) e aos grupos funcionais das moléculas que a compõe (através do FTIR). Essas técnicas e procedimentos experimentais estão descritos no item 4.2.

4.1.3 Água

A água utilizada em todos os ensaios e para confecção de todas as misturas, foi proveniente da rede pública de distribuição de Sorocaba-SP, tratada pela autarquia: Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAAE).

4.1.4 Resíduos de beneficiamento de rochas ornamentais

Para esse estudo foram coletados em uma marmoraria na cidade de Sorocaba-SP, dois tipos de resíduos: de corte e polimento de rochas ornamentais. A seguir apresenta-se a nomenclatura adotada neste trabalho para esses resíduos:

- RC: Resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO) proveniente do processo de corte das rochas, (in natura) em marmoraria;
- RCQ: Resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO) proveniente do processo de corte e queimado em mufla a 500°C;

- RP: Resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO) proveniente do processo de polimento das rochas (in natura) em marmoraria.

Os mesmos resíduos RC e RP são produzidos nessa marmoraria em quantidades consideráveis, aproximadamente 17.500 kg por semana, os quais são destinados a aterros de inertes, conforme aponta Leite (2019).

Inicialmente, esses resíduos foram coletados na forma de lama, foram secos em estufa Quimis (modelo Q317M) a 50°C durante 72h e em seguida, foram transformados em pó com o auxílio de um amofariz. Parte do resíduo de corte foi queimado em mufla (marca Quimis, modelo Q318M24), a 500°C por 24h.

Optou-se por não queimar o resíduo de polimento, uma vez que em Leite (2019) pode-se perceber que o resíduo de polimento possui um teor de orgânicos maior que o resíduo de corte, isto 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. Assim, ao queimar o resíduo de polimento, possíveis compostos orgânicos voláteis podem ser liberados gerando substâncias tóxicas para o meio ambiente e o ser humano (SHAH, K.W.& LI, W. 2019).

Os resíduos foram caracterizados quanto a sua composição química (por FRX), a sua mineralogia (por DRX) e quanto aos grupos funcionais das moléculas que os compõem (por FTIR).

Segundo, Lozano-Lunar et. al. (2020) em estudos de resíduos análogos a massa específica encontrada foi de 2,64 g/cm². Em Ghorbani et al. (2019) o valor da massa específica foi de 2,63 g/cm² e em Cordeiro et al. (2016) foi de 2,64 g/cm². Já em Leite (2019), as massas específicas do RC e RP se apresentaram iguais dentro do erro experimental, sendo de (2,6±0,2)g/cm² e (2,4±0,3)g/cm², respectivamente.

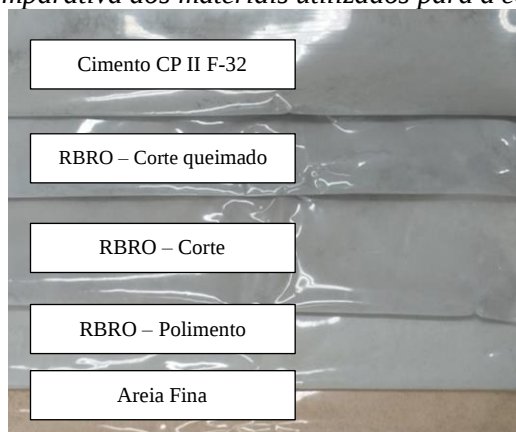
Em estudo realizado por Farias et. al. (2018) com resíduo de corte de mármore e granito, observou-se que a granulometria, feita por difração a laser do resíduo mostrou que 50% dos seus grãos são inferiores a 0,02 mm, ou seja, atende ao requisito da norma NBR 12653 (ABNT, 2015) para uso como fíler (adição mineral). Segundo Leite (2019) que estudou resíduos similares ao RC e ao RP quanto a sua granulometria feita por peneiramento, observou-se que as maiores porcentagens das massas desses resíduos ficaram retidas na peneira de menor abertura (0,075 mm) e no fundo.

Conforme o estudo citado no item 3.3.1, levou-se em consideração neste trabalho os resíduos de beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO) como Classe II A, não perigosos e

não inertes, de acordo com a classificação dos resíduos sólidos da norma NBR 10004 (ABNT, 2004).

Na Figura 3 apresenta-se os materiais utilizados para a realização das misturas de argamassas, pode-se notar a semelhança da finura do cimento com os resíduos e a sutil mudança de cor entre os resíduos.

Figura 3 – Imagem comparativa dos materiais utilizados para a confecção das argamassas



Fonte: Arquivo da autora

4.2 Caracterização físico-química dos materiais empregados na confecção das argamassas

Neste item do trabalho serão apresentadas as técnicas e procedimentos experimentais utilizados para a obtenção das características físico-química dos materiais utilizados para confeccionar as argamassas. A Figura 4 apresenta as técnicas empregadas para caracterizar os materiais utilizados.

Figura 4 – Técnicas empregadas para caracterizar os materiais utilizados



Fonte: Elaborado pela autora

4.2.1 Caracterização da massa específica dos materiais

A massa específica é a relação entre a massa do agregado seco e seu volume, excluindo os poros permeáveis NBR NM 52 (ABNT, 2009).

A areia foi submetida ao ensaio de determinação da massa específica, realizado no Laboratório de Ensaio de Materiais (LEMAT), do Centro Universitário Facens, conforme a NBR NM 52 (ABNT, 2009).

Para a realização do ensaio de massa específica, pesou-se 1 kg da areia, em uma balança digital (marca Marte, modelo AS 2000C, resolução $\pm 0,01\text{g}$) e colocou-se a amostra em um recipiente coberto com água e deixando em repouso por 24 h. Após esse período, retirou-se a água e estendeu-se a areia em uma superfície plana submetendo-a a uma suave corrente de ar, assegurando que a secagem da areia fosse uniforme até que os seus grãos não fiquem muito aderidos entre si. Essa areia é colocada sem comprimir, em um molde metálico tronco-cônico, (de (40 ± 3) mm de diâmetro superior, (90 ± 3) mm de diâmetro inferior, (75 ± 3) mm de altura e espessura mínima de 1mm). E com o auxílio de uma haste metálica de compactação golpeou-se suavemente 25 vezes, a areia no molde. Este procedimento de colocar a areia úmida no molde e golpear 25 vezes, foi realizado até a condição em que ao levantar o molde verticalmente, observar-se que ainda há umidade superficial suficiente para a areia desmoronar ao retirar o molde. Esta condição para a areia é denominada condição de saturada superfície seca.

Separa-se $500\pm 0,1$ g da areia nessa condição. Essa amostra foi inserida no frasco normalizado da NBR NM 52 (ABNT, 2009), com capacidade de 500 ± 5 cm³ à temperatura de 20 °C. Na sequência, anotou-se a massa do conjunto areia mais frasco (m_1). Continuou-se o procedimento completando o frasco com água próximo da marca de 500 ml e moveu-se, o frasco de forma a eliminar as bolhas de ar. Após eliminar as bolhas de ar colocou-se o conjunto em temperatura constante de (21 ± 2) °C. Aguardou-se aproximadamente 1 h e completou-se o frasco, novamente, com água até a marca de 500 cm³ e, assim, determinou-se a massa (m_2). Então, retirou-se a areia do frasco e secou-a à temperatura de (105 ± 5) °C, em estufa (da marca DeLeo, modelo DL-SED), até se obter massa constante (m). Esses procedimentos foram realizados três vezes e os resultados realizados com a mesma amostra não diferenciaram em mais de $\pm 0,02$ g/m³, garantindo a repetitividade do ensaio. Calculou-se a massa específica aparente do agregado seco (da areia), conforme a equação 1 e 2.

$$d_1 = \frac{m}{V - V_a} \quad (\text{eq. 1})$$

Onde:

d_1 : É a massa específica aparente do agregado seco, em g/cm³;

m : É a massa da amostra seca em estufa;

V : É o volume do frasco em cm³;

V_a : É o volume de água adicionada ao frasco, em g/cm³;

Calculou-se V_a , que é o volume da água adicionada ao frasco de acordo com a equação 2, em cm³:

$$V_a = \frac{m_2 - m_1}{\gamma_a} \quad (\text{eq. 2})$$

Onde:

m_1 : É a massa do conjunto (frasco+agregado);

m_2 : É a massa total (frasco+agregado+água);

γ_a : É a massa específica da água em g/cm³;

V_a : é o volume de água adicionada ao frasco, em g/cm³;

A massa específica do agregado saturado superfície seca, foi calculada utilizando a equação 3:

$$d_2 = \frac{m_s}{V - V_a} \quad (\text{eq. 3})$$

Onde:

d_2 : é a massa específica do agregado saturado superfície seca, em g/cm³;

m_s : é a massa da amostra na condição saturada superfície seca, em gramas;

V : é o volume do frasco, em g/cm³;

V_a : é o volume de água adicionada ao frasco, em g/cm³;

E, finalmente, a massa específica da areia, foi calculada utilizando a equação 4:

$$d_3 = \frac{m}{(V - V_a) - \frac{m_s - m}{\gamma_a}} \quad (\text{eq. 4})$$

Onde:

d_3 : é a massa específica do agregado, em g/cm³;

m : é a massa da amostra seca em estufa, em gramas;

V : é o volume do frasco, em g/cm³;

V_a : é o volume de água adicionada ao frasco, em g/cm³;

m_s : é a massa da amostra na condição saturada superfície seca, em gramas;

γ_a : É a massa específica da água em g/cm³;

4.2.2 Determinação da massa unitária

A massa unitária é a relação entre a massa do agregado lançado no recipiente e o volume desse recipiente, de acordo a NBR NM 45 (ABNT, 2006).

A areia foi submetida ao ensaio de determinação da massa unitária, realizado conforme a NBR NM 45 (ABNT, 2006). Para esse ensaio o procedimento inicial é secar ao ar as amostras de agregado (areia). Em seguida determinou-se a massa de um recipiente (m_r) paralelepípedo de volume conhecido (20 dm³). Encheu-se o recipiente com uma concha tomando o cuidado de lançar o agregado de uma altura de 10 a 12 cm do topo do recipiente. Quando o recipiente se encontrava cheio até o topo, realizou-se o procedimento de rassamento (regularização) da superfície. Em seguida foi utilizada uma régua metálica para rasar a areia, após preenchido o recipiente de volume conhecido com o agregado até o topo, determinou-se a massa do conjunto como o auxílio de uma balança digital (resolução de $\pm 0,1$ kg, marca Marte, modelo LS 20), descontando a massa do recipiente (m_r), determinou-se a massa da amostra de agregado (m). Com o auxílio da equação 5, determinou-se massa unitária da areia.

$$\rho_{ap} = \frac{m_{ar} - m_r}{V} \quad (\text{eq. 5})$$

Onde:

ρ_{ap} : massa unitária, em kg/m³;

m_{ar} : é a massa do recipiente mais o agregado, em kg;

m_r : é a massa do recipiente vazio, em kg;

V : é o volume do recipiente, m³.

4.2.3 *Análise granulometria por peneiramento*

A areia foi submetida ao ensaio de granulometria por peneiramento, realizado no Laboratório de Ensaios de Materiais (LEMAT), conforme a NBR NM 248 (ABNT, 2003).

A amostra de areia foi preparada de acordo com a NBR NM 27 (ABNT, 2001). Depois de secas ao ar separou-se aproximadamente 1000 g da areia, medida em uma balança mecânica (resolução de $\pm 0,01$ kg, marca Welmy, modelo R-62). Feito isto, montou-se sobre um peneirador mecânico, o conjunto de peneiras da série padrão, segundo a NBR NM 248 (ABNT, 2003) com tampa e fundo, conforme a Tabela 12. Após esta etapa, colocou-se a amostra de areia, na peneira de maior abertura, promovendo-se a agitação mecânica por um tempo de aproximadamente 15 a 20 minutos. Na sequência, destacou-se a peneira superior do conjunto e determinou-se a massa do material nela retido, com o auxílio de uma balança digital (resolução de $\pm 0,01$ g, da marca Marte, modelo AS 2000C). Na sequência, agitou-se a peneira manualmente depois de colocar tampa e fundo por um minuto. Mais uma vez, removeu-se o material retido na peneira e determinou-se a massa. Nesse momento, verificou-se se a diferença das massas encontradas antes e depois do minuto de agitação contínua foi maior ou igual a 1% da massa inicialmente retida, se fosse, peneirou-se novamente por mais um minuto, mas se a diferença fosse menor ou igual a 1%, passou-se à próxima peneira após introduzir nesta o material passante na anterior que tenha ficado no fundo da peneira, após o minuto de peneiramento contínuo. Repetiu-se esse procedimento para todas as peneiras.

Mediu-se a massa total do material retido em cada uma das peneiras e no fundo do conjunto. A soma dessas massas não diferiu de mais de 0,3% da massa inicial da amostra. Para cada peneira calculou-se a porcentagem retida, em massa, com aproximação de 0,1%. E, se determinou a porcentagem retida acumulada, com aproximação de 1%. Assim, obteve-se a dimensão máxima característica do agregado (diâmetro máximo do agregado), que é a peneira na qual fica a porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5%. Por fim, conclui-se o ensaio, determinando o módulo de finura do agregado ($\sum$ % acumuladas nas peneiras da série normal $\div 100$).

Tabela 12 – *Série de peneiras utilizadas nos ensaios de granulometria da areia*

Mesh (malha)	Série Normal	Série Intermediária
3/8	9,5 mm	-----
1/4	-----	6,3 mm
4	4,75 mm	-----
8	2,36 mm	-----
16	1,18 mm	-----
30	0,6 mm	-----
50	0,3 mm	-----
100	0,15 mm	-----

Fonte: Elaborado pela autora

4.2.4 Caracterização por determinação de impurezas orgânicas

A areia foi submetida ao ensaio de determinação de impurezas orgânicas, realizado no Laboratório de Ensaios de Materiais (LEMAT), conforme a NBR NM 49 (ABNT, 2001). Para isto tomou-se uma amostra da areia, com cerca de 200 g, medida em balança digital (resolução de $\pm 0,01$ g, da marca Marte, modelo AS 2000C) com o material úmido a fim de evitar a segregação da fração pulverulenta. Em seguida, preparou-se no frasco Béquer de 1.000 cm³, uma solução de hidróxido de sódio a 3% e outra solução padrão de ácido tânico a 2%. No frasco Erlenmeyer com rolha esmerilhada, de aproximadamente 250 cm³, adicionou-se (200 $\pm$ 5) g da areia seca ao ar e 100 cm³ da solução de hidróxido de sódio, agitou-se vigorosamente e deixou-se em repouso durante (24 $\pm$ 2) h em ambiente escuro. Após o período de repouso, filtrou-se, empregando papel de filtro qualitativo, a solução que esteve em contato a areia, recolhendo-a em tubo Nessler, de aproximadamente 250 cm³.

Simultaneamente ao procedimento acima, preparou-se a solução padrão, adicionando a 97 cm³ da solução de hidróxido de sódio, 3 cm³ da solução de ácido tânico a 2%. Agitou-se e deixou em repouso durante (24 $\pm$ 2) h em ambiente escuro.

Após período de 24 h, transferiu-se a solução, com o auxílio de funil de haste longa, para outro tubo Nessler de aproximadamente 250 cm³. Assim, avaliou-se a quantidade de matéria orgânica comparando a cor da solução obtida com a da solução padrão, observando, se a cor é mais escura, mais clara ou igual à da solução padrão.

4.2.5 Determinação do material fino que passa através da peneira 75 μm , por lavagem (material pulverulento)

A areia foi submetida ao ensaio de determinação do material fino que passa através da peneira 75 μm , por lavagem (material pulverulento), conforme a NBR NM 46 (ABNT, 2003), com o objetivo de caracterizar a sua parcela pulverulenta (pó).

O método utilizado para determinação do material fino que passa através da peneira 75 μm , por lavagem, para o agregado (areia) foi o procedimento A, descrito na norma NBR NM 46 (ABNT, 2003). O processo se inicia secando, aproximadamente 100 g, da areia em uma estufa (resolução de ± 5 °C, da marca DeLeo, modelo DL-SED) até massa constante à temperatura de (110 ± 5) °C. Na sequência, com o auxílio de uma balança mecânica de resolução ($\pm 0,01$ kg, capacidade de 10kg, exatidão $\pm 0,05$ kg da marca Welmy, modelo R-62), determinou-se a massa da amostra de ensaio (m_i). Após a secagem e determinação da massa, colocou-se a amostra de ensaio no recipiente suficiente para conter a amostra coberta com água e permitir sua agitação vigorosa sem perda de amostra ou água. Assim, adicionou-se água até cobri-la. Feito isto, agitou-se a amostra vigorosamente para obter a completa separação de todas as partículas mais finas que 75 μm das maiores e para que o material fino fique em suspensão. Imediatamente após agitar, verteu-se a água de lavagem contendo os sólidos suspensos e dissolvidos sobre um jogo de peneiras, onde a peneira inferior tem abertura de malha de 75 μm e a superior corresponde à peneira de 1,18 mm, ambas de acordo com os requisitos da NM-ISO 3310-1 (ABNT, 2010), dispostas de forma que a malha de maior abertura esteja na parte de cima. Evitou-se ao máximo a decantação das partículas mais graúdas da amostra.

Na sequência, adicionou-se uma segunda quantidade de água à amostra no recipiente, agitou-se e passou-se pelas peneiras como descrito anteriormente. Repetiu-se esta operação até que a água da lavagem ficasse bem clara e realizou-se a comparação visual da limpidez entre a água, antes e depois da lavagem, utilizando provetas de 1000 cm^3 de vidro transparente.

Feito isto, retornou todo o material retido nas peneiras com um fluxo contínuo de água sobre a amostra lavada. Então, secou-se a areia lavada até massa constante à temperatura de (105 ± 5) °C. Finalmente, determinou-se a massa da amostra (m_f).

Calculou-se a quantidade de material que passa pela peneira 75 μm por lavagem conforme a equação 6:

$$m = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100 \quad (\text{eq. 6})$$

Onde:

m : é a porcentagem de material mais fino que a peneira de 75 μm por lavagem;

m_i : é a massa original da amostra seca; em gramas;

m_f : é a massa da amostra seca após a lavagem, em gramas.

4.2.6 Análises por fluorescência de Raios X (FRX)

As análises por fluorescência de Raios X (FRX) foram realizadas para os três tipos de resíduos, a areia e o cimento, permitindo de forma qualitativa e quantitativa estabelecer a proporção (concentração) em que cada elemento químico se encontra presente nas amostras, ou seja, foram utilizadas para determinar a composição química dos materiais.

Essa análise foi realizada utilizando-se um espectrômetro de fluorescência de Raios X, (da marca Rigaku, modelo Supermini 200) do laboratório de Química do Centro Universitário Facens. As medidas foram realizadas com tubo de Raios X operado a 50 kV e 15mA e com potência de 750W.

As amostras foram preparadas por meio da prensagem (prensa hidráulica) em pastilhas de 4 cm de diâmetro por 1,5 cm de altura, utilizando como aglomerante ácido bórico na proporção de aproximadamente 30%, de forma a obter uma amostra compacta.

4.2.7 Análise por Difração por Raios-X (DRX)

Os resíduos, a areia e o cimento foram submetidos a análises de difração por Raios X (DRX). Os ensaios de difração de Raios X, foram realizados, utilizando um difratômetro de Raios X da Marca Rigaku, modelo MiniFlex 600, do laboratório de Química do Centro Universitário Facens. O ensaio consiste na incidência de um feixe de Raios X que interage com os planos cristalinos da amostra mudando a direção de sua propagação gerando um espectro com as características da cristalinidade da amostra.

Durante as caracterizações das amostras o equipamento operou com a fonte radiação de $\text{CuK}\alpha$ ($=1,5418 \text{ \AA}$), a uma tensão de 40 kV e corrente de 15 mA, no modo 2 Theta-Theta, na faixa de varredura de 5° a 85° e velocidade angular de $2^\circ/\text{min}$.

Para a preparação das amostras, como o equipamento dispõe de um porta amostras com cavidade (16x16 mm por 3 mm de profundidade, de vidro) preencheu-se, o mesmo, com as amostras, que se apresentavam na forma de pó fino. Com o auxílio de uma espátula pressionou-

se o material contra o porta amostras de maneira a distribuí-lo uniformemente. Verificou-se que a amostra estava preparada, quando se girava o porta amostras na posição vertical e as amostras não caíam.

4.2.8 Análises de espectroscopia no Infravermelho (FTIR)

Os três tipos resíduos, a areia e o cimento foram submetidos a análise de espectroscopia de absorção no Infravermelho (do inglês: FTIR – *Fourier Transformation Infrared*).

Segundo PIQUÉ (2012), a espectroscopia de infravermelho é o método pelo qual a absorção ou emissão de energia radiante causada pela interação entre a radiação eletromagnética e o material em estudo é analisada. A espectroscopia no infravermelho baseia-se no fato de que as moléculas têm a possibilidade de girar e vibrar em diferentes frequências (modos vibracionais normais). Ou seja, uma molécula pode absorver energia de fótons na faixa de energia infravermelha, no caso de haver uma diferença, no momento bipolar da molécula, enquanto ocorre um movimento vibracional rotacional e quando a frequência associada à radiação ressoa com o movimento vibracional, permitindo identificar grupos funcionais de moléculas orgânicas e os tipos de suas ligações entre os átomos dessas moléculas. Utilizando-se de tabelas de referência serão analisados os picos (bandas) levando em consideração a posição, a intensidade e o formato do pico, identificando assim, os compostos presentes nas amostras.

As análises de espectroscopia no Infravermelho (FTIR) foram realizadas, submetendo as amostras a 32 varreduras, na faixa de número de onda de 4000 cm^{-1} a 650 cm^{-1} , com resolução de 2 cm^{-1} . Para isso, foi utilizado o equipamento da marca Agilent Technologies, modelo Cary 630, do Centro Universitário Facens - Laboratório de Química. As amostras na forma de pó, foram aplicadas em seu estado natural diretamente no porta amostra.

4.3 Métodos para a preparação das misturas das argamassas

Produziu-se misturas de argamassas, na proporção de 1:3 (cimento:areia), com substituição de parte do cimento pelos resíduos de beneficiamento de rochas ornamentais (RBROs), em massa, nas proporções 0% (referência), 7,5%, 10% e 20%. As misturas foram denominadas neste trabalho, conforme segue:

1. Misturas RC: corresponde as argamassas obtidas com substituição parcial do cimento pelo o RBRO do processo de corte;
2. Misturas RCQ: corresponde as argamassas obtidas com substituição parcial do cimento pelo o RBRO do processo de corte após ser queimado a 500°C;
3. Misturas RP: corresponde as argamassas obtidas com substituição parcial do cimento pelo o RBRO do processo de polimento.

Conforme apresentado no item 3.3.2 os autores Campos (2018), Teixeira et. al. (2018) e Gonçalves, Moura e Molin (2002) estudaram em misturas de concreto a substituição parcial do cimento por resíduos de rochas ornamentais, similares aos resíduos estudados nesse trabalho. Esses autores adotaram teores de substituição dos resíduos, pelo cimento, de 5%, 7,5%, 10%, 12,5% e 20%. Como os melhores resultados de desempenho foram encontrados para as misturas de 7,5 e 10%, esses estudos, nortearam as escolhas dos teores adotadas nesse trabalho (7,5%, 10% e 20%).

A Tabela 13 apresenta as quantidade de materiais utilizados para confeccionar as argamassas produzidas na proporção de 1:3 e, nos teores de 7,5%, 10% e 20% de substituição do cimento pelos resíduos RC , RCQ e RP, respectivamente. As misturas foram produzidas da mesma forma e com as mesmas quantidades de materiais, alterando apenas, o tipo de resíduo empregado, como pode ser observado na Tabela 13, mas nota-se que ao substituir o cimento pelos resíduos nos teores estudados tem-se a redução da quantidade do cimento, em massa, proporcional ao teor de substituição pelos resíduos e, por consequência, o aumento do fator água/cimento (a/c).

Tabela 13 – *Quantidades, em massa, dos materiais utilizados nas misturas de argamassas com substituição parcial do cimento (teores indicados em %), pelo RBRO proveniente do processo de corte, corte queimado e de polimento (RC, RCQ e RP, respectivamente)*

Nomenclatura das misturas	RBRO (kg)	Cimento CP II F-32 (kg)	Areia (kg)	Água (litros)	a/c
RC_0% ou RCQ_0% ou RP_0%	0,000	0,375	1,125	0,323	0,860
RC_7,5% ou RCQ_7,5% ou RP_7,5%	0,028	0,347	1,125	0,323	0,930
RC_10% ou RCQ_10% ou RP_10%	0,038	0,338	1,125	0,323	0,956
RC_20% ou RCQ_20% ou RP_20%	0,075	0,300	1,125	0,323	1,075

Fonte: Elaborado pela autora

Também foram produzidas misturas de argamassa, na proporção de 1:3 (cimento:areia), com substituição de parte da areia, em massa, nas proporções 0% (referência), 7,5%, 10%, 20% e 30%, e estas foram denominadas neste trabalho como:

1. Misturas RCA: corresponde as argamassas obtidas com substituição parcial da areia, pelo o RBRO do processo de corte;
2. Misturas RCQA: corresponde as argamassas obtidas com substituição parcial da areia, pelo o RBRO do processo de corte após ser queimado.

Para as misturas de argamassa com substituição parcial da areia pelos RBROs, optou-se por estudar, além dos teores de 7,5%, 10% e 20%, o teor de 30% de substituição, já que se objetiva comparar estas medidas com os dados estudados por Leite (2019), que adotou os teores de 10%, 20% e 30%, e segundo sugestão deste trabalho para novas pesquisas.

Como apresentado em Leite (2019) os resíduos provenientes do processo de polimento das chapas de rochas ornamentais (RP) apresentam diversos outros resíduos misturados a ele: tampas de resinas e colas, embalagens etc. Desta forma, optou-se por estudar os desempenhos das misturas com substituição parcial da areia, apenas os resíduos provenientes do processo do (RC e RCQ).

A Tabela 14 apresenta as quantidades de materiais utilizados para confeccionar as argamassas produzidas na proporção de 1:3 e nos teores de 7,5%, 10%, 20% e 30% de substituição da areia pelos resíduos RC e RCQ, respectivamente. As misturas foram produzidas da mesma forma e com as mesmas quantidades de materiais, alterando apenas, o tipo de resíduo empregado, como pode ser observado na Tabela 14, mas nota-se que ao substituir a areia pelos resíduos nos teores estudados tem-se a redução da quantidade de areia, em massa, proporcional ao teor de substituição pelos resíduos.

Tabela 14 – Quantidades, em massa, dos materiais utilizados nas misturas de argamassas com substituição parcial da areia (teores indicados em %), pelo RBRO proveniente do processo de corte e corte queimado (misturas RCA e RCQA).

Nomenclatura dos Traços	RBRO (kg)	Cimento CP II F-32 (kg)	Areia (kg)	Água (litros)	a/c
RCA_0% ou RCQA_0%	0,000	0,375	1,125	0,323	0,860
RCA_7,5% ou RCQA_7,5%	0,084	0,375	1,041	0,323	0,860
RCA_10% ou RCQA_10%	0,113	0,375	1,013	0,323	0,860
RCA_20% ou RCQA_20%	0,225	0,375	0,900	0,323	0,860
RCA_30% ou RCQA_30%	0,338	0,375	0,788	0,323	0,860

Fonte: Elaborado pela autora

A partir das proporções apresentadas nas Tabelas 7 e 8 foram produzidas misturas de argamassas conforme a norma NBR 16541 (ABNT, 2016). A areia utilizada nas misturas foi seca ao ar e todos os materiais (cimento, areia, resíduos e água) foram pesados em balança mecânica (resolução de $\pm 0,01$ kg, capacidade de 10 kg, da marca Welmy, modelo R-62).

Em seguida moldou-se corpos de prova para avaliar as resistências à tração na flexão e à compressão das argamassas, de acordo com a NBR 13279 (ABNT, 2005). Finalizada a moldagem, os corpos de prova foram mantidos dentro dos moldes prismáticos por 48 horas até a desmoldagem, seguindo de condicionamento em local com temperatura ($23 \pm 2^\circ\text{C}$) e umidade controlada (mais de 95%), evitando perdas de água excessiva para o ambiente, até as datas dos ensaios tecnológicos. Os ensaios de resistências à tração na flexão e à compressão, foram realizados com 7, 14 e 28 dias de cura. Para isso foram moldados 6 corpos de provas para cada mistura perfazendo um total de 102 corpos de prova moldados de argamassa. A Figura 5 apresenta três corpos de prova moldados conforme NBR 13279 (ABNT, 2005).

Figura 5 – Moldagem dos corpos de prova de argamassa (fôrma de 40x40x160cm).



Fonte: Arquivo da autora

4.4 Caracterização da argamassa no estado endurecido

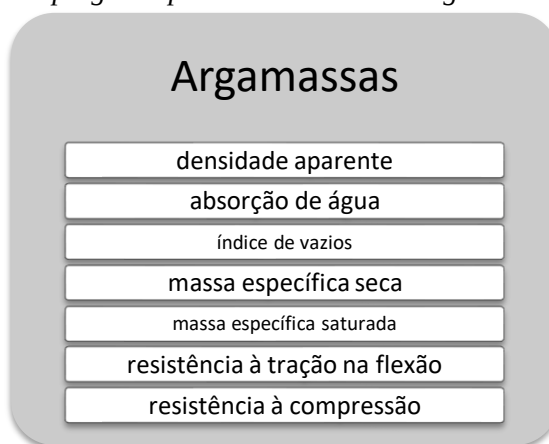
Optou-se neste trabalho por analisar apenas as propriedades das argamassas no estado endurecido uma vez que em Leite (2019), Sancak, & Özkan (2015), Molnar & Manea (2016), Mashaly Et Al (2016), Aliabdo, Abd Elmoaty & Auda (2014), Khyaliya, Kabeer, & Vyas (2017) observou-se a redução do índice de consistência da argamassa (estado fresco) para as substituição do cimento ou areia com o aumento dos teores de RBROs incorporados. A redução da trabalhabilidade foi considerada devido a finura dos RBROs que é inferior ou similar ao cimento e a areia em todos os estudos, assim como os RBROs utilizado neste trabalho. Durante a produção de todas as argamassas estudadas era visível a diminuição da trabalhabilidade das

misturas conforme o aumento dos teores de substituição do cimento ou da areia, contudo notou-se que as misturas com substituição da areia tiveram uma redução da trabalhabilidade maior que as misturas com substituição de cimento, conforme esperado, já ao substituir os resíduos por areia as misturas ficam com mais finas e, portanto, para se manter a mesma trabalhabilidade seria necessário o aumento da quantidade de água das misturas.

4.4.1 Técnicas empregadas para a caracterização das argamassas no estado endurecido

As técnicas empregadas para a caracterização argamassas no estado endurecido são apresentadas de forma resumida na Figura 6.

Figura 6 – *Técnicas empregadas para caracterizar as argamassas no estado endurecido*



Fonte: Elaborado pela autora

4.4.2 Densidade aparente das argamassas no estado endurecido

O ensaio de densidade aparente das argamassas estudadas no estado endurecido foi realizado segundo a norma NBR 13280 (ABNT, 2005), aos 28 dias de cura dos corpos de prova de todas as misturas de argamassa, no LEMAT/Facens ((Laboratório de Ensaio de Materiais do Centro Universitário Facens). Através dos resultados deste ensaio é possível classificar as argamassas obtidas conforme a sua densidade aparente segundo a norma NBR 13281 (ABNT, 2005).

Para a determinação da densidade aparente das argamassas, os corpos de prova tiveram suas dimensões medidas com um paquímetro (marca Mitutoyo, com resolução de 0,1 mm). Na sequência, foram pesados (m), com o auxílio de uma balança mecânica (resolução de $\pm 0,01$ kg,

da marca Welmy, modelo R-62). De posse das dimensões dos corpos de prova, foi calculado o volume (V) do corpo-de-prova, com base na equação 7:

$$V = l \cdot h \cdot c \quad (\text{eq. } 7)$$

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 .

Através do volume dos corpos de prova (V) e de suas massas, foi calculado a densidade aparente, conforme a equação 8:

$$\rho_{\text{máx}} = \frac{m}{V} \quad (\text{eq. } 8)$$

Onde:

$\rho_{\text{máx}}$ 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 .

4.4.3 Absorção de água, índice de vazios e massa específica para argamassas

Realizado no LEMAT/Facens, os ensaios de absorção de água, índice de vazios e massa específica para argamassas foi realizado segundo a norma NBR 9778 (ABNT, 2009). Nestes testes, foram utilizados como corpos de prova, pedaços dos corpos de prova que foram utilizados nos ensaios de resistência a tração na flexão aos 28 dias.

A absorção de água é a tendência de a água preencher os poros “vazios” (permeáveis) do corpo, neste caso da argamassa. O índice de vazios é a relação entre a massa seca do material e o volume total, incluindo todos os poros permeáveis e impermeáveis. Já a massa específica é a relação entre a massa do corpo de prova de argamassa e seu volume, excluindo os poros permeáveis (BERTOLINI, 2010).

Os ensaios absorção de água, índice de vazios e massa específica foram realizados iniciando-se pela secagem das partes dos corpos de prova em estufa (resolução de $\pm 5^\circ\text{C}$, da marca DeLeo, modelo DL-SED), por 72 horas (M_s). Após secagem, foi realizada a pesagem das partes dos corpos de prova, com a balança mecânica (resolução de $\pm 0,01$ kg, da marca Welmy e modelo R-62), com capacidade para medida hidrostática. Na sequência, as partes dos corpos de prova foram imersos em água pelo período de 72 horas. Imediatamente, ao término deste período as partes dos corpos de prova foram pesadas com suas massas saturadas (M_{sat}). Desta forma, os cálculos de absorção de água foram feitos com base na equação 9:

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

Onde:

A é a absorção de água, em porcentagem;

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

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

Em seguida, os corpos-de-prova foram pesados na balança hidrostática, para se obter as massas saturadas das amostras imersas em água (W). A equação 10 foi utilizada para transformar o valor indicado pesagem em massa saturada da amostra imersa:

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

Onde:

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

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

Logo após, o índice de vazios pode ser também calculado através da equação 11:

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

Onde:

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

Finalmente, a massa específica da amostra seca e a massa específica da amostra saturada foram calculadas, respectivamente, conforme as equações 12 e 13:

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

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

Onde:

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

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

$\rho_{\text{água}}$ é a massa específica da água, em g/cm³.

4.4.4 Resistência à tração na flexão das argamassas

Os ensaios de resistência à tração na flexão dos corpos de prova de argamassa, após 7, 14 e 28 dias de cura, foram realizadas no LEMAT/Facens, conforme a NBR 13279 (ABNT, 2005).

Para a avaliação da resistência à tração das argamassas foi utilizada uma prensa hidráulica (marca Forney, Modelo - FT 40, resolução de $\pm 0,01$ tf), com certificado de calibração pela empresa Dinatest, de identificação 776c/19.

Os ensaios foram realizados posicionando os corpos de prova de argamassa na prensa hidráulica, com uso de dispositivos, segundo a NBR 13279 (ABNT, 2005) e levadas a ruptura. Os dispositivos utilizados têm o objetivo de garantir a distribuição correta das cargas aplicadas e, portanto, permitir o posicionamento correto dos corpos de prova, conforme a Figura 7.

Figura 7 – Corpo de prova de argamassa posicionado na prensa, após a ruptura



Fonte: Arquivo da autora

A prensa fornece os valores de carga (força) aplicadas verticalmente (F_t), conhecendo-se as dimensões dos corpos de prova é possível, obter a resistência à tração na flexão (R_t) em (MPa), utilizando-se a equação 14.

$$R_t = \frac{1,5 * F_t * L}{b * d^2} \quad (\text{eq. 14})$$

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.

d é a altura média do corpo-de-prova, em mm.

b é a largura média do corpo-de-prova, em mm.

Com as informações determinadas, é possível classificar as argamassas, segundo a NBR 13281 (ABNT, 2005), conforme a resistência à tração na flexão.

4.4.5 Resistência à compressão das argamassas

Os ensaios de resistência à compressão aos 7, 14 e 28 dias, das argamassas, foram realizadas no LEMAT/Facens, conforme a NBR 13279 (ABNT, 2005).

Para a avaliação da resistência à compressão foi utilizada uma prensa hidráulica (marca Forney, Modelo - FT 40, resolução de $\pm 0,01$ tf), com certificado de calibração pela empresa Dinateste, de identificação 776c/19. As partes dos corpos de prova de argamassa utilizados no ensaio de resistência à tração na flexão, foram separados para a realização deste teste. As duas partes de área de 4×4 cm dos corpos de provas foram posicionadas na prensa hidráulica e levadas a ruptura. Por fim, com os dados das cargas máximas aplicadas pela prensa (F_c), e considerando a área de ensaio de 1600 mm^2 , determinou-se a resistência à tração na flexão (R_c), através da equação 15.

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (\text{eq. 15})$$

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 .

Com as informações determinadas, é possível classificar as argamassas, segundo a NBR 13281 (ABNT, 2005), conforme a resistência à compressão.

4.4.6 Análise estatística dos resultados

Para os resultados dos ensaios de densidade aparente, absorção de água, índice de vazios, massa específica seca, massa específica saturada, resistência à tração na flexão e resistência à compressão realizados para as misturas de argamassa no estado endurecido, aos 28 dias de cura, foi adotado como método de análise estatística, a ANOVA (Análise de Variância). Desta forma, avaliou-se todos os teores de substituição do cimento pelo RBRO (0% - referência, 7,5%, 10% e 20%) e os teores de substituição da areia pelo RBRO (0% - referência, 7,5%, 10%, 20% e 30%). O método ANOVA, neste trabalho, foi aplicado por meio do software

MS Excel, utilizando-se o índice de significância (α) de 5%. A ferramenta verifica as hipóteses de igualdade entre as médias dos resultados avaliados (hipótese: H_0) ou descarta a igualdade entre as médias (hipótese H_1), indicando que existe ao menos uma diferença entre os resultados.

Na análise de variância se faz necessário buscar as variações entre grupos e dentro dos grupos (que são as várias misturas de argamassas), através dos cálculos da soma de quadrados entre os grupos (SQE), equação 16, e da soma dos quadrados dentro dos grupos (misturas de argamassas) (SQR), pela equação 17 (OLIVEIRA, 2017):

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

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

Onde:

K: número de grupos amostrais

n: número de amostras por grupo

N: 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 (OLIVEIRA, 2017), respectivamente:

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

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

Na sequência dos 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 (OLIVEIRA, 2017):

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

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

Com os resultados das equações 16 a 21, foi possível calcular o índice $F_{\text{observado}}$, através da equação 22, que é comparado com o $F_{\text{crítico}}$, obtido através do cruzamento dos dados glE e glR:

$$F_{\text{observado}} = \frac{MQE}{MQR} \quad (\text{eq. 22})$$

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

Onde a hipótese H_1 foi verificada, o Teste de Tukey (OLIVEIRA, 2017) foi realizado para se estudar entre quais médias houve diferenças representativas ou não representativas, ou seja, se a diferença das médias de duas misturas de argamassas for inferior a diferença mínima simplificada (dms), pode-se constatar que não há diferença representativa estatisticamente para estas misturas. Para o cálculo da diferença mínima significativa utilizou-se a equação 23:

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

Onde:

q : é o valor da amplitude estudatizada 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).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização dos materiais para a produção das argamassas.

5.1.1 Resultados da caracterização por massa específica

As medidas do valor da massa específica da areia estudada neste trabalho, feitos em triplicata, conforme descrito o item 4.2.1, é de $(2,6 \pm 0,3) \text{ g/cm}^3$.

Como a areia estudada apresenta a sua massa específica entre $2,0 \text{ g/cm}^3$ e $3,0 \text{ g/cm}^3$, pode-se classificá-la como agregado normal, segundo a NBR 12655 (ABNT, 2015).

Os resultados apontados por Leite (2019) para massa específica dos resíduos são: RC $(2,6 \pm 0,2 \text{ g/cm}^2)$ e RP $(2,4 \pm 0,3 \text{ g/cm}^2)$. Esses resultados são similares ao valor da massa específica da areia utilizada, justificando a escolha destes resíduos para substituição parcial da areia na argamassa.

5.1.2 Resultados dos ensaios para determinação da massa unitária

A medida do valor da massa unitária da areia estudada neste trabalho, feito em triplicata, conforme descrito o item 4.2.2 é de $(1,48 \pm 0,07) \text{ g/cm}^3$.

A massa unitária da areia apresenta-se dentro dos padrões da maioria dos agregados naturais, que têm massa unitária entre $1,0$ a $2,0 \text{ g/cm}^3$, ou seja, a areia é considerada um agregado normal, utilizada para produção dos chamados concretos normais de aproximadamente $2,4 \text{ g/cm}^3$ de massa específica (ABCP, 2000).

5.1.3 Resultados da análise granulometria

Neste item são apresentados e discutidos os resultados obtidos, por meio do ensaio de granulometria, da areia utilizada para confecção das argamassas, conforme o procedimento descrito no item 4.2.3.

Por meio do ensaio de granulometria obteve-se a dimensão máxima característica e o módulo de finura da areia empregada para a confecção das argamassas. O diâmetro máximo obtido foi de $1,18\text{mm}$, já o módulo de finura determinado foi de $1,60$, atendendo ao requisito da norma NBR 7211 (ABNT, 2009), onde o módulo de finura da zona utilizável inferior varia de $1,55$ a $2,20$.

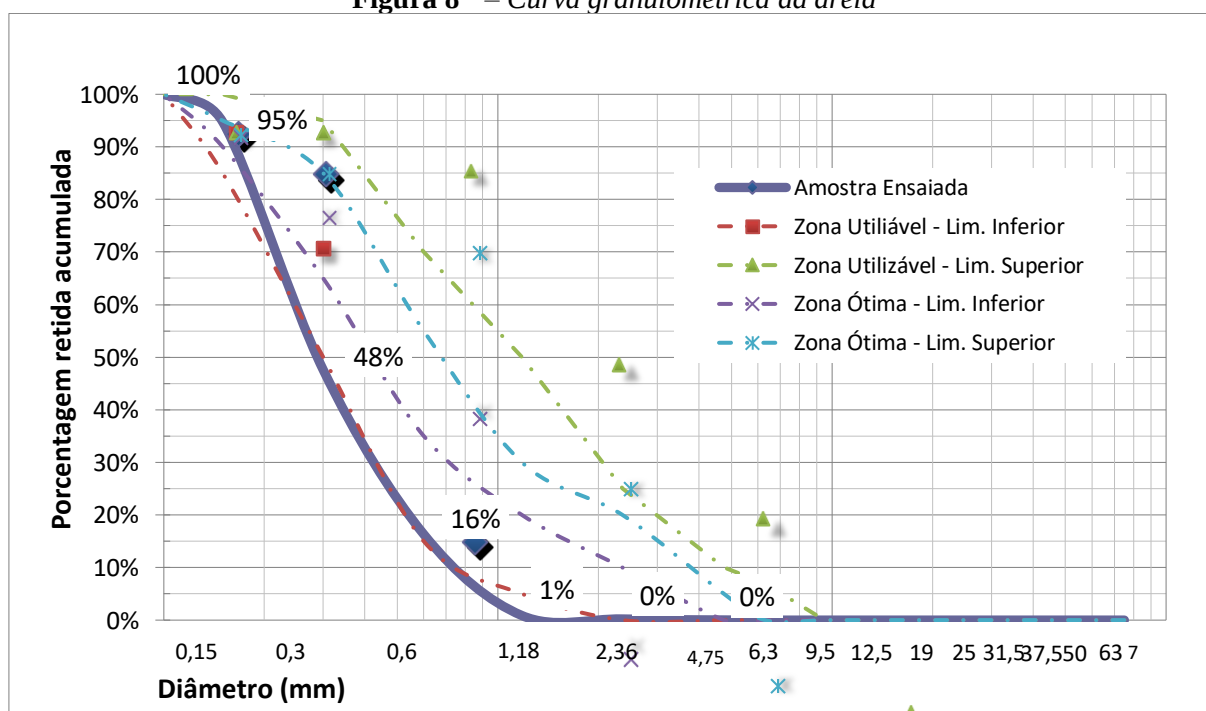
Na Tabela 15 observa-se os dados do ensaio de granulometria da areia. Segundo a norma NBR 7211 (ABNT, 2009) pode ser classificar a areia como um agregado miúdo, pois seus grãos passam 100% na peneira com abertura de malha de 4,75 mm. Pode-se, ainda, classificar a areia como fina (partículas com tamanhos entre 0,06 e 0,20 mm), segundo a norma NBR 6502 (ABNT, 1995).

Tabela 15 – Dados do ensaio de granulometria da areia

Peneiras (mm)	Média das Amostras		
	% Retida	% retida acumulada	% que passa
4,75	0,0	0	100
2,36	0,2	0	100
1,18	0,7	1	99
0,6	15,3	16	84
0,3	31,4	48	52
0,15	47,1	95	5
fundo	5,3	100	0
Somatória		160	-

Na Figura 8, pode-se observar a curva granulométrica da areia ensaiada e comparada às curvas limites utilizáveis para confecção de concretos, segundo a norma NBR 7211 (ABNT, 2009). Nota-se que a amostra de areia atende aos requisitos de norma, levando-se em consideração o desvio padrão do ensaio, a curva da amostra é praticamente igual ao Limite Inferior da Zona Utilizável.

Figura 8 – Curva granulométrica da areia

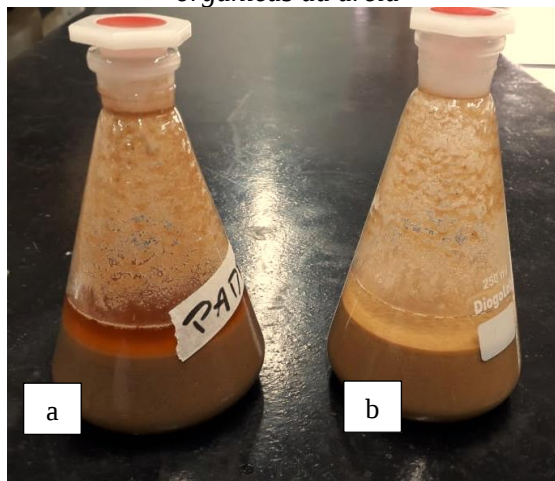


Fonte: Elaborado pela autora

5.1.4 Determinação de impurezas orgânicas

Para atender as especificações da NBR 7211 (ABNT, 2009) outro parâmetro relevante para a caracterização do agregado miúdo é a determinação de impureza orgânica. Esse ensaio foi descrito no item 4.2.4. Pode-se observar na Figura 9 que a solução obtida (a) se apresentou de cor mais clara que a da solução-padrão (b), portanto, atendendo ao requisito da norma e validando, neste requisito, a utilização da areia para a produção das misturas de argamassas realizadas neste trabalho.

Figura 9 – Comparação entre a solução-padrão e a solução obtida na determinação das impurezas orgânicas da areia



Fonte: Arquivo da autora

5.1.5 Resultados da determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem (material pulverulento)

Com o objetivo de caracterizar a areia para a confecção das argamassas, realizou-se o ensaio de determinação de material pulverulento, ou seja, material na forma de pó. Este ensaio foi realizado conforme descrito no item 4.2.5. O objetivo desta determinação foi atender as especificações da norma NBR 7211 (ABNT, 2009), que estabelece que para concretos submetidos a desgaste superficial (pior condição), a quantidade de material pulverulento relativo à massa do agregado miúdo (areia) deve ser no máximo de 3%. Desta forma a porcentagem de material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem, da areia é de $(2,02 \pm 0,10)\%$.

A areia utilizada neste trabalho atendeu a especificação da norma NBR 7211 (ABNT, 2009), já que a porcentagem de material pulverulento presente na amostra é menor do que 3%.

5.1.6 Resultados das análises de fluorescência de Raios X

A Tabela 16 apresenta os resultados da composição química das amostras de resíduo RBRO, do cimento e da areia a ser utilizada na produção das argamassas, obtida por FRX. Outros elementos foram identificados em porcentagens inferiores a 1% nas amostras.

Os resultados da porcentagem em massa para os três tipos de resíduos, mostra que o elemento predominante é o Si (aprox. 50%*m/m*). O segundo elemento predominante é o óxido de alumínio, seguido do óxido de ferro e óxido de cálcio, mostrando semelhança entre os resíduos.

Como os resíduos são provenientes de rochas ornamentais da região sul do país, pode-se afirmar, que são predominantemente compostos por rochas do tipo granito (Tabela 2). Em Farias et. al. (2018) a análise da composição química de um resíduo de corte de mármore e granito, identificou a mesma ordem de predominância dos elementos, como segue: SiO₂ (61,88%*m/m*), Al₂O₃ (13,79%*m/m*), Fe₂O₃ (7,71%*m/m*) e CaO (6,58%*m/m*), desta forma, apresentando similaridade com os resíduos estudados nesse trabalho. Resultados similares para o RC e RP foram observados por (SANTOS et. al., 2013).

Tabela 16 – Tabela comparativa com os resultados dos teores de elementos químicos dos RBROs, cimento e areia.

Elementos químicos	Teores (% <i>m/m</i>)				
	RC	RCQ	RP	Cimento CP II-F-32	Areia
SiO ₂	51,7	48,8	51,7	16,7	74,0
Al ₂ O ₃	13,5	12,3	14,2	4,93	13,1
Fe ₂ O ₃	11,3	10,3	6,23	3,87	3,14
CaO	7,44	13,9	16,2	61,9	1,09
MgO	4,71	3,86	3,66	5,74	1,24
K ₂ O	2,92	3,12	2,63	0,78	3,63
Na ₂ O	3,35	2,93	2,90	0,49	2,03
TiO ₂	2,39	2,19	1,11	-	0,84
SO ₃	0,80	1,19	0,207	4,84	0,45

Fonte: Elaborado pela autora

Observa-se maior presença de concentração de ferro, nos resíduos RC e RCQ, possivelmente proveniente do processo de corte, o que pode ser atribuído a possível presença de material originário do equipamento de corte das peças de rochas ornamentais.

Em Santos et. al (2013), ressalta-se que resíduos ricos em $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$, como os RC, RCQ e RP, apresentam grande potencial para serem utilizados na confecção de argamassas para a construção civil.

Dentre os vários requisitos da NBR 12653 (ABNT, 2015), considera-se que um material é pozolânico se a soma da porcentagem em massa dos elementos SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 for superior a 70%. As somas desses óxidos para os três resíduos (RC, RCQ e RP) são superiores a 70%, entretanto, em Alves (2008) tem-se que o resíduo de rochas graníticas, não foi considerado um material pozolânico, justamente pelos minerais já se encontrarem cristalizados, sem a possibilidade de reação com o $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

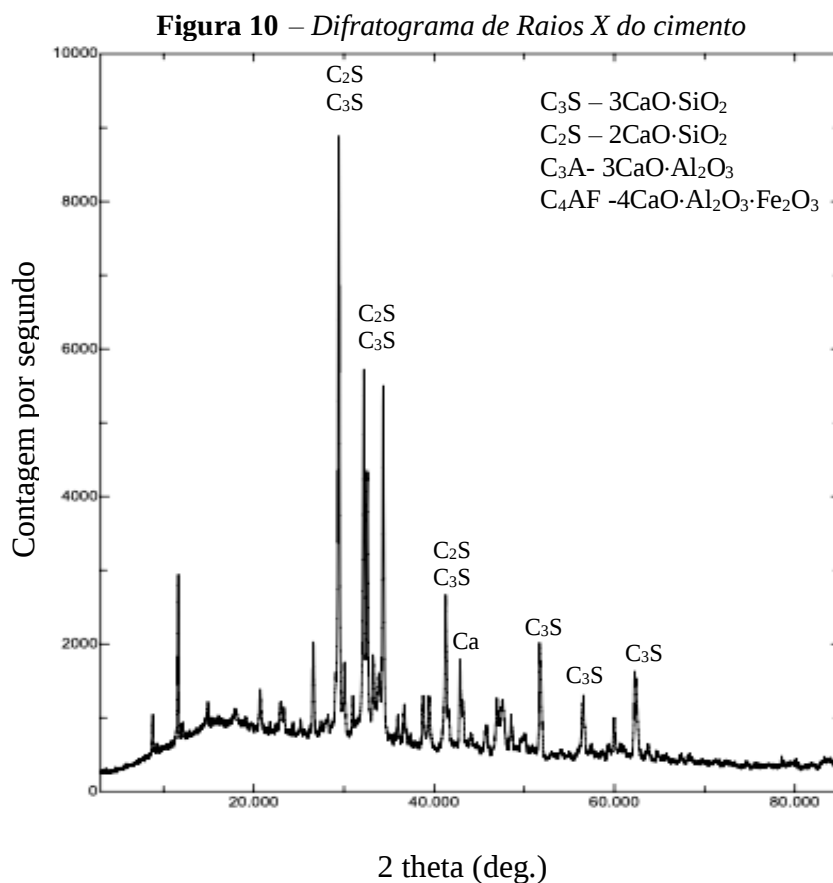
De forma equivalente em Gupta (2016) os resultados da composição química na areia, apresentam a predominância de SiO_2 (74 %m/m), seguido pelos óxidos de alumínio, ferro e cálcio, assim como nos resíduos deste trabalho, porém, esses em porcentagem de massa/massa são inferiores.

Assim, a similaridade entres esses materiais sugere a substituição parcial da areia pelos resíduos para produção das argamassas.

Para o cimento são observados resultados equivalentes em Nezerka (2018), Rossa (2009) e Toledo Filho et. al (2007), mas não há semelhança nos resultados observados para o cimento comparados aos resíduos. Impurezas como magnésio, sódio, potássio e enxofre, conforme esperado, foram encontradas na amostra do CP II -F-32 (METHA, 2014).

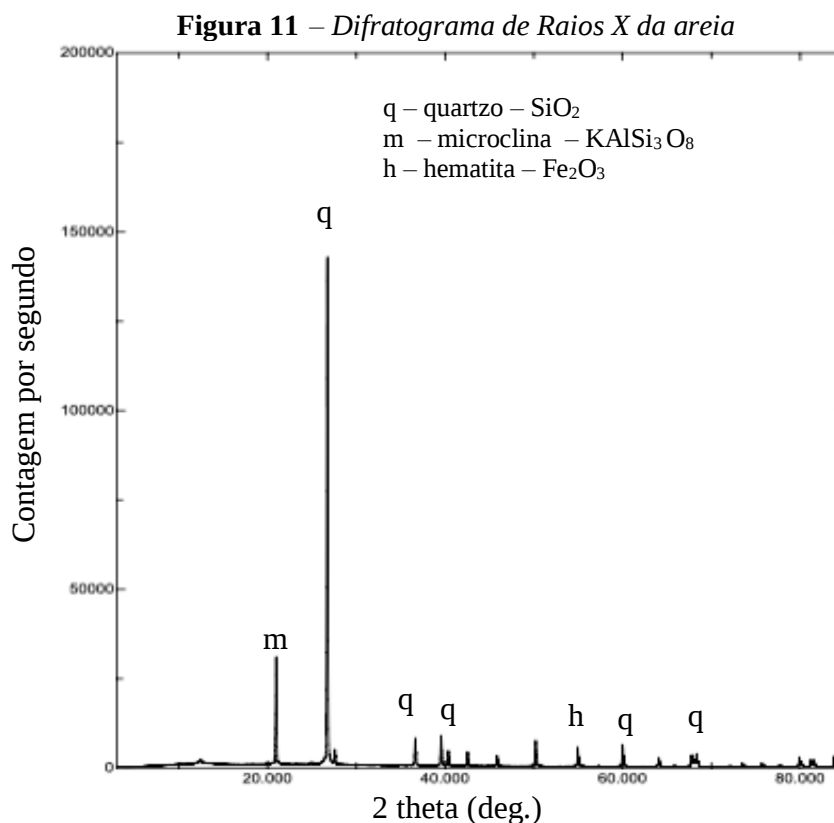
5.1.7 Resultados dos ensaios de difração por Raios X (DRX)

Na Figura 10 é apresentado o difratograma de Raios X obtido para o cimento. São identificados, conforme esperado, os óxidos complexos $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ e $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ (0). Estes óxidos são expressos comumente como C_3S (silicato tricálcico), C_2S (silicato dicálcico), C_3A (aluminato tricálcico) e C_4AF (ferroaluminato de cálcio), respectivamente (METHA, 2014). Resultados análogos são encontrados em Lozano-Lunar et. al. (2020) e Scheffer & Piccini (2018). Estes resultados corroboram com a análise elementar do cimento (Tabela 16), na qual os óxidos de Ca, Si, Al e Fe apareceram como principais elementos presentes.



Fonte: Elaborado pela autora

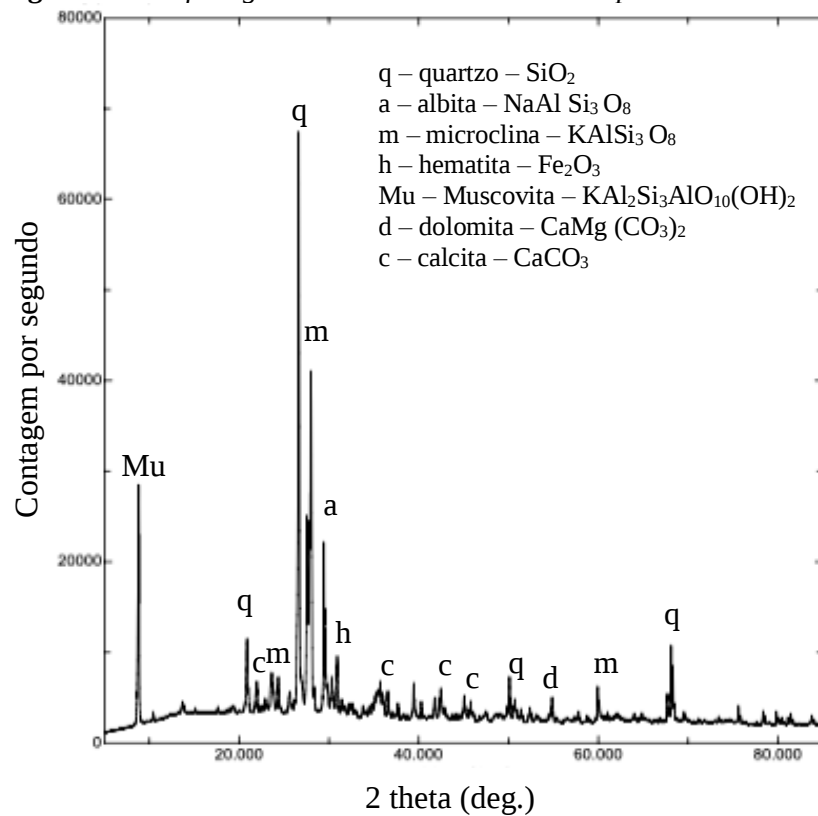
Na Figura 11 apresenta o difratograma de Raios X para a areia. São identificados, conforme esperado, os picos principais de quartzo (SiO_2), hematita (Fe_2O_3) e microclima ($KAlSi_3O_8$). Resultados análogos são encontrados em Lozano-Lunar et. al. (2020) e corroboram com a análise elementar da areia (Tabela 16), na qual os óxidos de Si, Al e Fe apareceram como principais elementos presentes.



Fonte: Elaborado pela autora

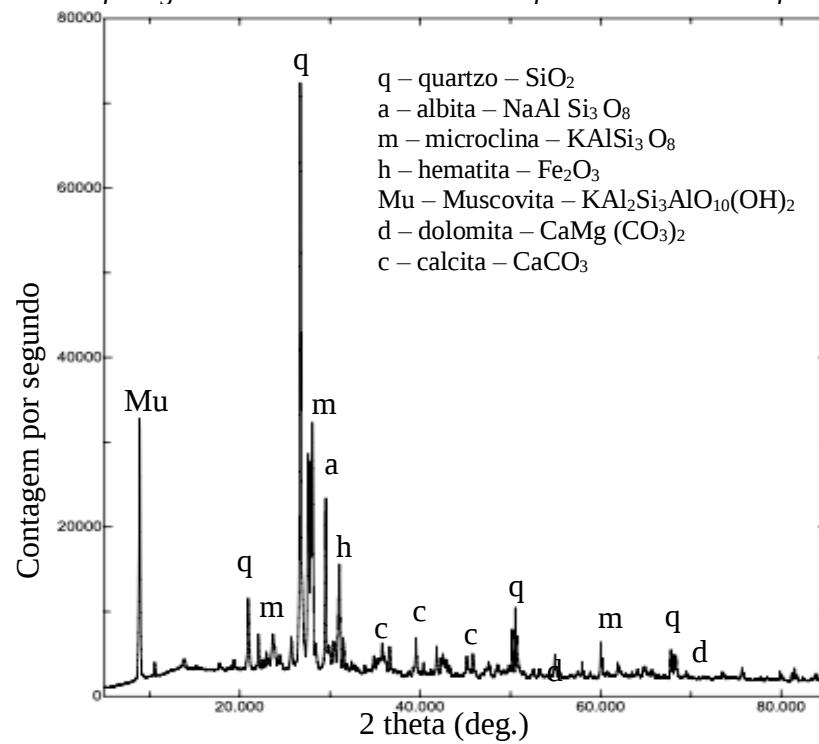
São apresentados nas Figuras 11, 12 e 13 os difratogramas dos resíduos: RC, RCQ e RP, respectivamente, obtidos por DRX. Os 3 tipos de RBRO estudados, não apresentam mudanças significativas entre suas mineralogias. Eles indicam a presença predominante de quartzo (SiO_2), albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), microclina (KAlSi_3O_8), hematita (Fe_2O_3), calcita (CaCO_3), dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) e Muscovita ($\text{KAl}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$) nos três resíduos, as fases detectadas estão de acordo com aquelas observadas por outros autores como Lozano-Lunar et. al. (2020), Teixeira et. al (2018), Farias et. al (2018) e Santos & Galembeck (2016). Desta forma, esses resultados comprovam o que foi apresentado na análise elementar dos resíduos, na Tabela 16, na qual Si, Al, Fe, Ca, Mg, K e Na apareceram como principais elementos presentes. Assim, pode-se constatar pouca reatividade dos resíduos em decorrência dos difratogramas apresentarem um pico cristalino bem definido referente ao quartzo (SiO_2) e ausência de halo amorfo (TEIXEIRA et al., 2018).

Figura 12 – Difratoograma de Raios X do RBRO do processo de corte (RC)

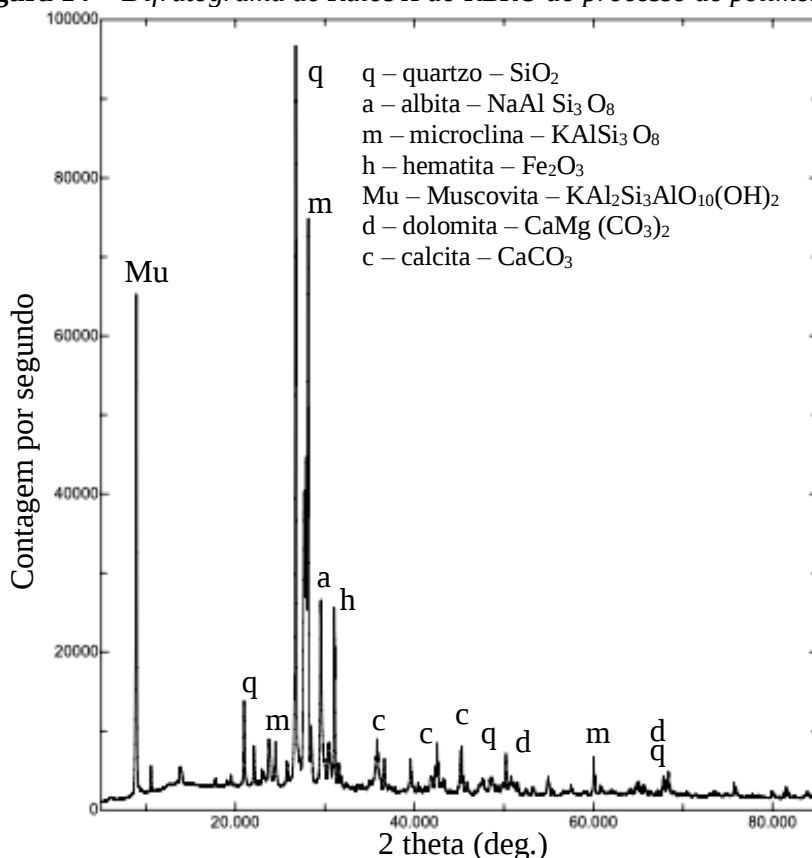


Fonte: Elaborado pela autora

Figura 13 – Difratoograma de Raios X do RBRO do processo de corte e queimado (RCQ)



Fonte: Elaborado pela autora

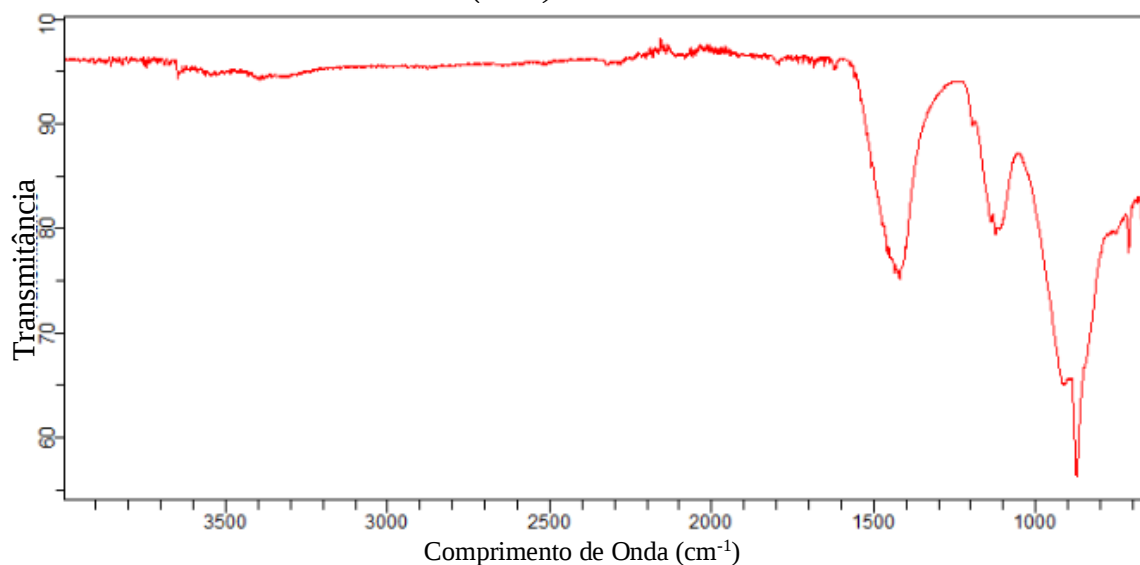
Figura 14 – Difratoograma de Raios X do RBRO do processo de polimento (RP)

Fonte: Elaborado pela autora

5.1.8 Resultados dos ensaios de espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

O resultado da análise por espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) para o cimento utilizado na produção das argamassas é apresentado na Figura 15. Observa-se, conforme esperado, picos de transmitâncias entre $850\text{--}890\text{ cm}^{-1}$ e $1400\text{--}1500\text{ cm}^{-1}$, que confirmam a presença do carbonato de cálcio (CO_3^{2-}) e nas bandas entre $900\text{--}1000\text{ cm}^{-1}$ são atribuídas ao estiramento C-S-H, devido ao SO_4^{2-} , grupos de etringita e fases ricas em enxofre (S) (PIQUE &VAZQUEZ, 2012; TONOLI et. al, 2016).

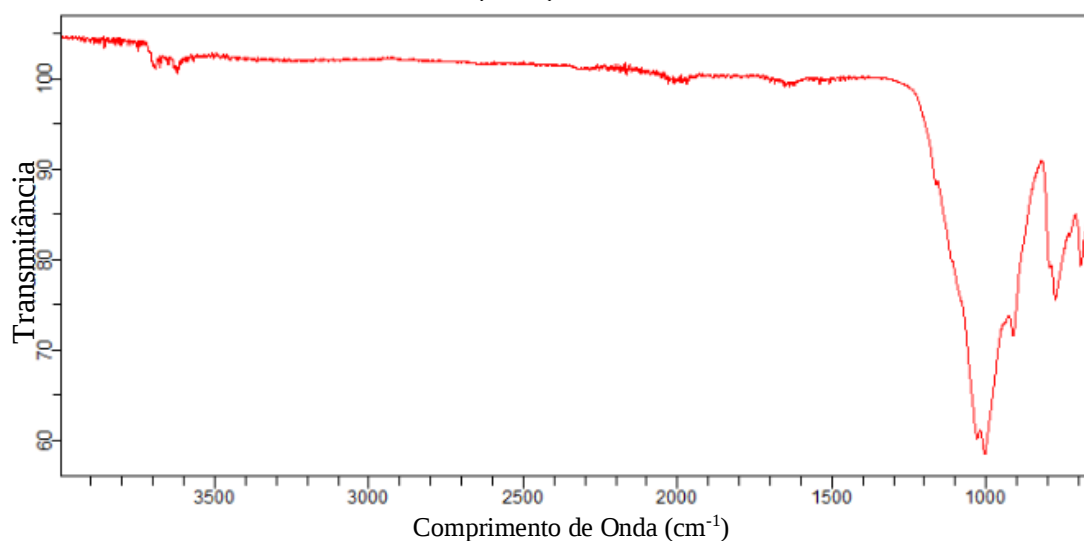
Figura 15 – Resultado do ensaio de espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) do cimento



Fonte: Elaborado pela autora

Nas Figura 16 é apresentado o resultado do ensaio de espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier para a areia. São observadas, conforme esperado, as bandas ao redor de 980 cm⁻¹, 775 cm⁻¹ e 640 cm⁻¹, que são atribuídas ao estiramento Si-O-Si, resultado do SiO₂ (SANTOS & GALEMBECK, 2016; THAKUR et al.,2019). Os resultados corroboram com os dados apresentados nas análises por FRX (Tabela 16), onde o elemento predominante da areia é o SiO₂, da mesma forma que os resíduos, conforme observados nas análises de FTIR das Figuras 16, 17 e 18.

Figura 16 – Resultado do ensaio de Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) da areia

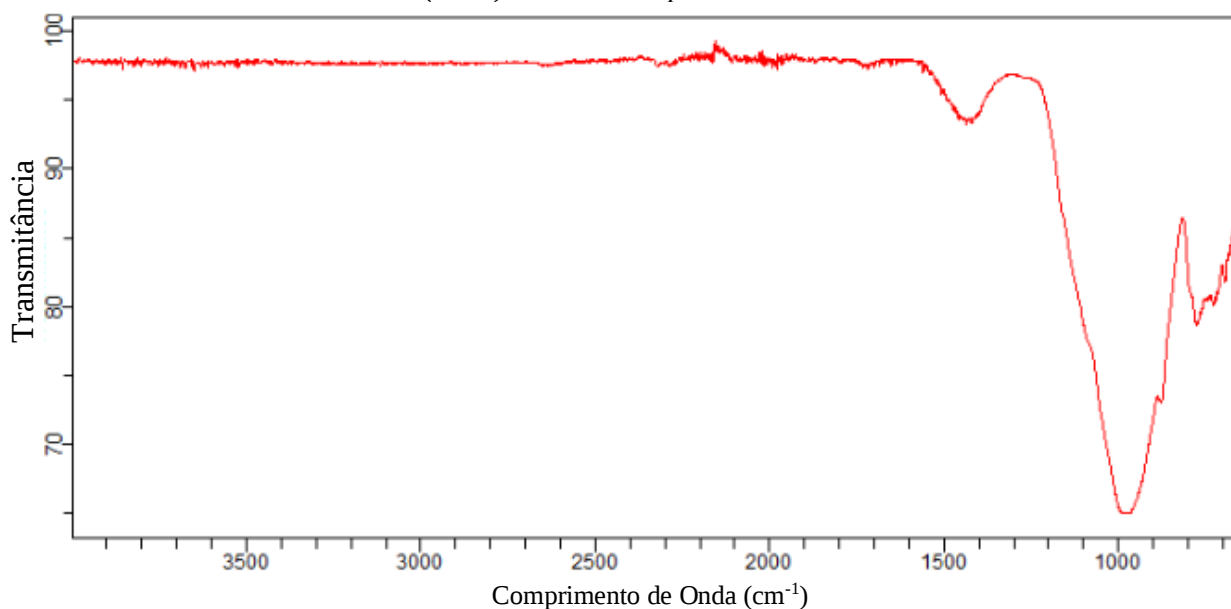


Fonte: Elaborado pela autora

Observa-se para os 3 tipos de RBRO que as análises por espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) apresentam picos de transmitâncias ao redor de 1430 cm^{-1} e 870 cm^{-1} que são atribuídas ao ligamento Ca-O, resultante do CaO. Já as bandas ao redor de 980 cm^{-1} , 775 cm^{-1} e 640 cm^{-1} são atribuídas ao estiramento Si-O-Si (SANTOS & GALEMBECK, 2016; THAKUR et al., 2019). Esses resultados ratificam a composição química dos resíduos, determinada por FRX (Tabela 16), onde se percebe a predominância do óxido de silício (SiO_2) e a presença do mineral quartzo, determinada por DRX (Figuras 11, 12 e 13). Observa-se ainda, que esses resultados são análogos aos da areia, justificando a sua substituição nas misturas de argamassas.

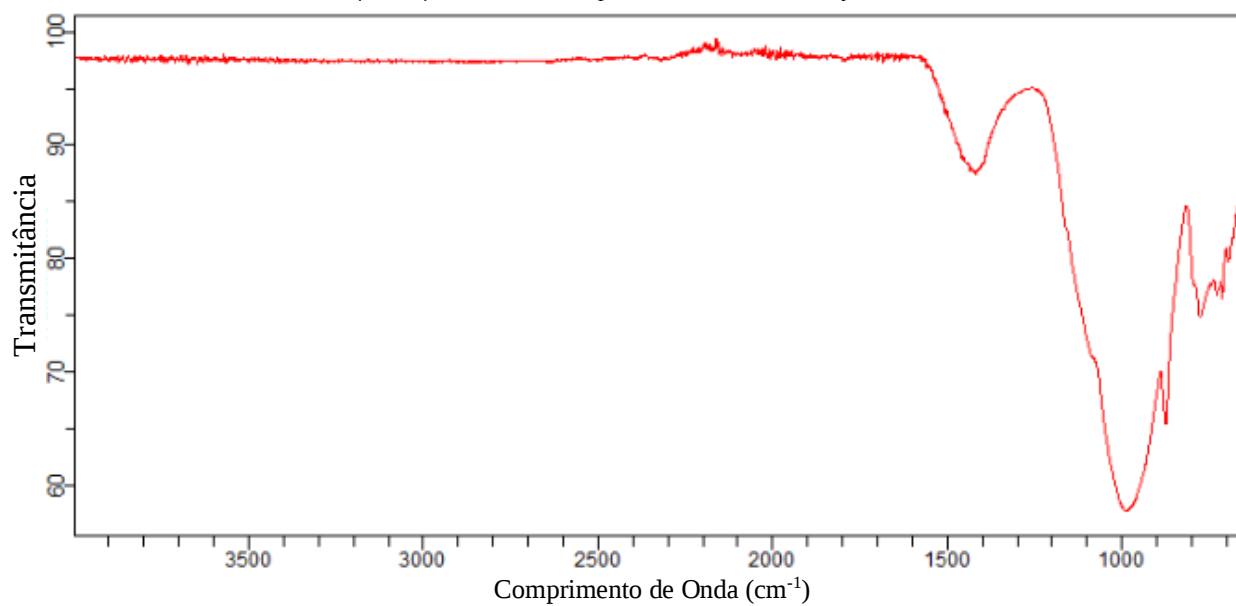
Comparando as Figuras 16, 17 e 18 se observa que os picos de transmitâncias ao redor de 1430 cm^{-1} e 870 cm^{-1} apresentam um deslocamento dos picos de transmitâncias para os diferentes resíduos. Desta forma, indica-se que óxido cálcio (CaO) se apresentam em concentrações diferentes nos resíduos, isto pode ser confirmado através nas análises por FRX (Tabela 16), onde temos que as porcentagens massa/massa de CaO dos resíduos, são: 7,44%; 13,9%; 16,2% para o RC, RCQ e RP, respectivamente.

Figura 17 – Resultado do ensaio de Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) do RBRO do processo de corte



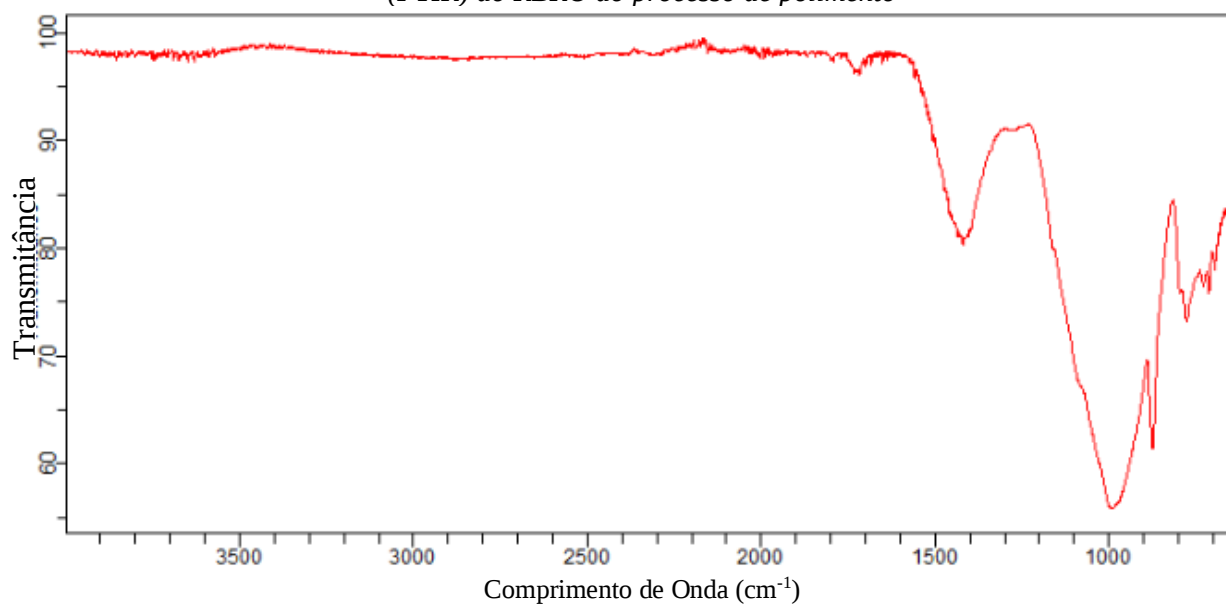
Fonte: Elaborado pela autora

Figura 18 – Resultado do ensaio de Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) do RBRO do processo de corte e queimado



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 19 – Resultado do ensaio de Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) do RBRO do processo de polimento



Fonte: Elaborado pela autora

5.2 Caracterização das argamassas no estado endurecido

5.2.1 Densidade aparente no estado endurecido das argamassas.

A densidade das argamassas depende principalmente da massa específica do agregado miúdo (areia) e do teor de ar incorporado na massa. No caso de aplicação manual da argamassa na construção, quanto mais leve, mais trabalhável será a longo prazo, pois reduz o esforço na aplicação. A densidade da argamassa no estado endurecido ocorre devido à saída de parte da água é um pouco menor do que o valor no estado fresco, cerca de 7% quando seca ao ar e 9% quando seca em estufa (ISAIA, 2007).

A Tabela 17 apresenta os resultados da densidade aparente das argamassas no estado endurecido, com substituição parcial do cimento pelos resíduos (misturas RC, RCQ e RP) e com substituição parcial da areia pelos resíduos (misturas RCA e RCQA). Comparando-se os resultados, aos 28 dias, tanto na substituição parcial do cimento como da areia pelos RBRO, nos teores estudados observa-se que os resultados de densidade aparente da argamassa não se alteram.

Tabela 17 – Média e desvio padrão das densidades aparente das argamassas no estado endurecido, com substituição do cimento e da areia pelo RBRO (kg/m^3), aos 28 dias.

Teores de Substituição	RC	RCQ	RP	RCA	RCQA
0%	2011 $\pm$ 29	1939 $\pm$ 10	1942 $\pm$ 10	1980 $\pm$ 14	1948 $\pm$ 41
7,5%	1927 $\pm$ 10	1948 $\pm$ 41	1958 $\pm$ 36	1986 $\pm$ 10	1980 $\pm$ 27
10%	1922 $\pm$ 10	1969 $\pm$ 41	1948 $\pm$ 10	1984 $\pm$ 24	1978 $\pm$ 31
20%	1953 $\pm$ 35	1918 $\pm$ 10	1960 $\pm$ 50	2024 $\pm$ 38	1948 $\pm$ 41
30%	-	-	-	2031 $\pm$ 21	1972 $\pm$ 24

Fonte: Elaborado pela autora

Por meio da Tabela 18 é possível observar que as análises de variância (ANOVA) mostram que os valores do $F_{\text{observado}}$ são menores que o valor do $F_{\text{crítico}}$ demonstrando que não há diferença estatística para os valores da densidade aparente em relação ao traço de referência (0%) para as misturas com substituição do cimento pelo RBRO. Já a Tabela 19 mostra que as análises de variância (ANOVA) para as misturas com substituição da areia pelo RBRO comprovando não haver diferenças significativas nos resultados da densidade aparente das argamassas no estado endurecido, pois os valores do $F_{\text{observado}}$ são menores que o valor do $F_{\text{crítico}}$.

Lozano-Lunar (2020) et. al. utilizou o lodo de granito substituindo a areia nas porcentagens 0%, 20% e 40% para a produção de argamassas e obteve os valores, aos 28 dias,

de densidade aparente de 1,93 g/cm³, 1,92 g/cm³ e 1,91 g/cm³, respectivamente. Esses resultados são análogos aos encontrados por Leite (2019) para a mistura de argamassa com substituição parcial do resíduo do processo de corte pela areia (mistura RCA).

Todas as misturas realizadas podem ser classificadas como M6, categoria de densidade aparente no estado endurecido mais elevada, maior que 1800kg/m³, conforme NBR 13281 (ABNT, 2005).

Tabela 18 – *Análise de variância (ANOVA) das densidades aparente das argamassas no estado endurecido, com substituição do cimento pelo RBRO, misturas RC, RCQ e RP.*

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F_{observado}</i>	<i>valor-P</i>	<i>F_{crítico}</i>
Entre grupos	0,0017	3	0,0006	0,38	0,77	3,10
Dentro dos grupos	0,0294	20	0,0015			
Total	0,0311	23				

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 19 – *Análise de variância (ANOVA) das densidades aparente das argamassas no estado endurecido, com substituição da areia pelo RBRO, misturas RCA e RCQA.*

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F_{observado}</i>	<i>valor-P</i>	<i>F_{crítico}</i>
Entre grupos	0,0029	4	0,0007	0,58	0,68	3,06
Dentro dos grupos	0,0186	15	0,0012			
Total	0,0215	19				

Fonte: Elaborado pela autora

5.2.2 Resultados da determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica das argamassas

Como grande parte das demonstrações patológicas nas argamassas estão combinadas à umidade, analisar absorção de água, índice de vazios e massa específica, permite comparar o desempenho das argamassas produzidas com os resíduos frente as argamassas de referência (comum), o que permitirá analisar melhor a aplicação das argamassas, ou seja, de maneira mais eficiente e segura (BERTOLINI, 2010).

• Absorção de água

A Tabela 20 apresenta os resultados da absorção de água das argamassas aos 28 dias, no estado endurecido, com substituição parcial do cimento pelos resíduos (misturas RC, RCQ e RP) e com substituição parcial da areia pelo resíduos (misturas RCA e RCQA). Comparando estes resultados observa-se não haver diferenças significativas entre todas as misturas e os

dados das Tabelas 15 a 17, mostram que os resultados da absorção de água analisados estatisticamente para cada uma das misturas estudadas, confirmando a ausência de diferença entre os resultados.

Tabela 20 – Média e desvio padrão dos resultados do ensaio de absorção de água, aos 28 dias de cura, das misturas de argamassas realizadas, em %.

Teores	RC	RCQ	RP	RCA	RCQA
0%	13,0 ± 0,2	12,9 ± 0,2	12,6 ± 0,5	13,6 ± 0,5	13,3 ± 0,2
7,5%	13,4 ± 0,4	13,4 ± 0,6	13,3 ± 0,5	12,5 ± 0,5	13,6 ± 0,5
10%	12,6 ± 0,1	12,9 ± 0,3	12,5 ± 0,4	13,8 ± 0,2	13,0 ± 0,2
20%	13,5 ± 0,5	13,4 ± 0,4	13,2 ± 0,2	12,6 ± 0,1	13,4 ± 0,6
30%	-	-	-	13,5 ± 0,2	13,4 ± 0,5

Fonte: Elaborado pela autora

Observa-se nas análises de variância (ANOVA) apresentadas na Tabela 21, que as misturas RC, RCQ e RP apresentam alguma diferença significativa para os resultados da absorção de água das argamassas aos 28 dias, pois pode-se notar que o valor do $F_{\text{observado}}$ é menor que o valor do $F_{\text{crítico}}$. Desta forma, realizou-se o Teste Tukey onde observa-se conforme a Tabela 22 não haver diferença significativas entre as misturas.

Tabela 21 – Análise de variância (ANOVA) da absorção de água das argamassas no estado endurecido, com substituição do cimento pelo RBRO, misturas RC, RCQ e RP.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	$F_{\text{observado}}$	valor-P	$F_{\text{crítico}}$
Entre grupos	3,3323	3	1,1108	8,45	0,0003	2,90
Dentro dos grupos	4,2087	32	0,1315			
Total	7,5410	35				

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 22 – Teste Tukey para os resultados da absorção de água das argamassas no estado endurecido, com substituição do cimento pelos RBROs para as misturas RC, RCQ e RP.

Comparação	$ \bar{X}_a - \bar{X}_b $	D_{ms}	Conclusão
0%-7,5%	0,5	0,988	não representativo
0%-10%	0,1		não representativo
0%-20%	0,6		não representativo
7,5%-10%	0,6		não representativo
7,5%-20%	0,0		não representativo
10%-20%	0,7		não representativo

Fonte: Elaborado pela autora

Os resultados de absorção de água para as misturas de argamassa com substituição de areia pelo RBRO (misturas RCA e RCQA) também foram analisados quanto a variância. A

Tabela 23 exibe os resultados da ANOVA para a absorção de água das misturas RCA, onde pode-se notar não haver diferença expressivas entre as misturas, já que o valor do $F_{\text{observado}}$ é menor que o valor do $F_{\text{crítico}}$.

Tabela 23 – *Análise de variância (ANOVA) da absorção de água das argamassas no estado endurecido, com substituição da areia pelos RBROs, para as misturas RCA e RCQA.*

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F_{observado}</i>	<i>valor-P</i>	<i>F_{crítico}</i>
Entre grupos	1,7884	4	0,4471	1,79	0,16	2,76
Dentro dos grupos	6,2324	25	0,2493			
Total	8,0208	29				

Fonte: Elaborado pela autora

Portanto, considera-se que não há diferenças significativas entre os resultados de absorção de água para todos os teores de misturas com substituição parcial do cimento ou da areia pelos resíduos de corte, corte queimado e de polimento.

- **Índice de vazios**

Os resultados dos índices de vazios das argamassas, aos 28 dias, no estado endurecido, com substituição parcial do cimento e areia, pelos resíduos são apresentados na Tabela 24. Comparando estes resultados observa-se não haver diferenças significativas entre todas as misturas estudadas, o que pode ser confirmado pelas análises apresentadas nas Tabelas 19 a 23.

Tabela 24 – *Média e desvio padrão dos resultados de índice de vazios, aos 28 dias de cura, das misturas de argamassas realizadas, em %.*

Teores	RC	RCQ	RP	RCA	RCQA
0%	24,3 ± 1,2	24,3 ± 1,2	23,5 ± 0,4	25,5 ± 1,1	24,3 ± 1,2
7,5%	25,5 ± 1,1	25,5 ± 1,1	25,2 ± 0,6	23,5 ± 0,4	25,5 ± 1,1
10%	24,3 ± 1,2	24,3 ± 1,2	23,5 ± 0,4	25,5 ± 1,1	24,3 ± 1,2
20%	25,5 ± 1,1	25,5 ± 1,0	25,2 ± 0,6	23,5 ± 0,4	25,5 ± 1,1
30%	-	-	-	25,5 ± 1,1	25,5 ± 1,1

Fonte: Elaborado pela autora

Por meio da análise de variância (ANOVA) pode-se observar que as misturas com RC, RCQ e RP apresentam pelo menos uma diferença significativa para os valores de índice de vazios, já que o valor de $F_{\text{observado}}$ é maior que o $F_{\text{crítico}}$, como é exposto na Tabela 25.

Na Tabela 26 observa-se as conclusões do Teste Tukey, mostrando não há diferenças representativas entre os resultados de índice de vazios para todas as misturas com substituição

parcial do cimento pelos RBRO. Estes resultados também foram observados por Leite (2019), onde as misturas similares com uso do resíduo de corte e polimento não apresentaram diferença significativas em relação ao índice de vazios.

Tabela 25 – *Análise de variância (ANOVA) do índice de vazios das argamassas no estado endurecido, com substituição do cimento pelo RBRO para as misturas RC, RCQ e RP.*

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F_{observado}</i>	<i>valor-P</i>	<i>F_{crítico}</i>
Entre grupos	15,4496	3	5,149861	6,24	0,002	2,90
Dentro dos grupos	26,4275	32	0,825861			
Total	41,8771	35				

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 26 – *Teste Tukey para os resultados do índice de vazios das argamassas no estado endurecido, com substituição do cimento pelo RBRO para as misturas RC, RCQ e RP.*

Comparação	$ \bar{X}_a - \bar{X}_b $	D_{ms}	Conclusão
0%-7,5%	1,28	1,430	não representativo
0%-10%	0,00		não representativo
0%-20%	1,33		não representativo
7,5%-10%	1,29		não representativo
7,5%-20%	0,05		não representativo
10%-20%	1,34		não representativo

Fonte: Elaborado pela autora

Nas misturas com substituição da areia pelo resíduo de corte (RCA), observa-se na análise de variância que o $F_{\text{observado}}$ é maior que o $F_{\text{crítico}}$ (Tabela 27). Logo, realizou-se o Teste Tukey para se observar quais os teores de resíduos de corte comparados apresentavam diferenças. E como pode-se notar na Tabela 28 não há valores representativos para os teores de 10%, 20% e 30% de incorporação de resíduo de corte em substituição a areia comparados a mistura de mistura de referência (0% - sem adição), ou seja, apresentando diferenças representativas apenas para a mistura com teor de 7,5%. Esta situação é análoga aos resultados de absorção de água para a mistura RCA, conforme esperado, já que para o cálculo do índice de vazios os parâmetros massas específicas secas e massa específicas saturadas são utilizados, assim como no cálculo da absorção de água. Desta forma, o mesmo erro experimental, devido às condições que influenciam na temperatura e umidade do laboratório, é atribuído para a determinação do índice de vazios da mistura RCA com teor de 7,5% de resíduo de corte. Reforça-se esta condição já que em Leite (2019) não há diferenças significativas entre os resultados de índice de vazios, nem para as misturas com substituição da areia pelo resíduo de corte e nem pelo resíduo de polimento.

Tabela 27 – Análise de variância (ANOVA) do índice de vazios das argamassas no estado endurecido, com substituição da areia pelo RBRO para as misturas RCA.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	$F_{\text{observado}}$	valor-P	$F_{\text{crítico}}$
Entre grupos	14,0219	4	3,5055	4,54	0,02	3,48
Dentro dos grupos	7,7288	10	0,7729			
Total	21,7507	14				

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 28 – Teste Tukey para os resultados do índice de vazios das argamassas no estado endurecido, com substituição da areia pelo RBRO para as misturas RCA.

Comparação	$ \bar{X}_a - \bar{X}_b $	D_{ms}	Conclusão
0%-7,5%	1,97	1,969	representativo
0%-10%	0,01		não representativo
0%-20%	1,97		não representativo
0%-30%	0,00		não representativo
7,5%-10%	1,99		representativo
7,5%-20%	0,01		não representativo
7,5%-30%	1,97		representativo
10%-20%	1,98		representativo
10%-30%	0,02		não representativo
20%-30%	1,96		não representativo

Fonte: Elaborado pela autora

A análise estatística pelo método ANOVA para as misturas com substituição da areia pelo resíduo de corte queimado (RCQA), mostraram não há diferença significativas entre os resultados de índice de vazios ($F_{\text{observado}} < F_{\text{crítico}}$) como pode-se observar na Tabela 29.

Tabela 29 – Análise de variância (ANOVA) do índice de vazios das argamassas no estado endurecido, com substituição da areia pelo RBRO para as misturas RCQA.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	$F_{\text{observado}}$	valor-P	$F_{\text{crítico}}$
Entre grupos	4,8467	4	1,2117	0,91	0,49	3,48
Dentro dos grupos	13,2937	10	1,3294			
Total	18,1405	14				

Fonte: Elaborado pela autora

Assim, observa-se que os resultados de índice de vazios para as misturas com substituição da areia pelos RBROs são iguais estatisticamente. Isto se deve pelas características físicas dos resíduos tais como massa específica e granulometria que são similares a areia.

Resumindo, observa-se não haver diferenças significativas entre os resultados de índices de vazios para todos os teores de misturas com substituição parcial do cimento ou da areia pelos resíduos de corte, corte queimado e de polimento (RBROs).

- **Massa específica seca**

A Tabela 30 apresenta os resultados da massa específica seca das argamassas, aos 28 dias, no estado endurecido, com substituição de parcial do cimento e areia, pelos resíduos. Estes resultados foram analisados estatisticamente pelo método ANOVA, e observa-se nas Tabelas 25 e 26 que os valores de $F_{\text{observado}}$ são inferiores aos valores de $F_{\text{crítico}}$, o que comprova que não há alterações no valor da massa específica seca em relação ao traço de referência (0%) para nenhum dos teores estudados. Para a mistura de argamassa com substituição parcial da areia pelo resíduo do processo de corte (mistura RCA) observa-se resultados similares aos encontrados por Leite (2019).

Tabela 30 – Média e desvio padrão dos resultados da massa específica seca, aos 28 dias de cura, das misturas de argamassas realizadas, em g/cm³.

Teores	RC	RCQ	RP	RCA	RCQA
0%	1,84 ± 0,08	1,86 ± 0,07	1,85 ± 0,09	1,83 ± 0,03	1,80 ± 0,06
7,5%	1,87 ± 0,04	1,87 ± 0,02	1,86 ± 0,04	1,86 ± 0,08	1,87 ± 0,03
10%	1,89 ± 0,07	1,85 ± 0,08	1,86 ± 0,07	1,81 ± 0,07	1,84 ± 0,06
20%	1,86 ± 0,03	1,86 ± 0,04	1,88 ± 0,04	1,84 ± 0,04	1,87 ± 0,02
30%	-	-	-	1,85 ± 0,07	1,86 ± 0,04

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 31 – Análise de variância (ANOVA) da massa específica seca das argamassas no estado endurecido, com substituição do cimento pelo RBRO para as misturas RC, RCQ e RP.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	$F_{\text{observado}}$	valor-P	$F_{\text{crítico}}$
Entre grupos	0,0022	3	0,0007	0,25	0,86	2,90
Dentro dos grupos	0,0933	32	0,0029			
Total	0,0954	35				

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 32 – Análise de variância (ANOVA) da massa específica seca das argamassas no estado endurecido, com substituição da areia pelo RBRO para as misturas RCA e RCQA.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	$F_{\text{observado}}$	valor-P	$F_{\text{crítico}}$
Entre grupos	0,0107	4	0,0027	1,01	0,42	2,76
Dentro dos grupos	0,0658	25	0,0026			
Total	0,0765	29				

Fonte: Elaborado pela autora

- **Massa específica saturada**

Os resultados da massa específica saturada, aos 28 dias, das argamassas, no estado endurecido, com substituição de parcial do cimento e areia, pelos resíduos são observados na Tabela 33. Assim como os resultados da massa específica seca, a massa específica saturada não apresentou diferença significativa em todas as porcentagens (teores) estudadas, como pode ser observado nas Tabelas 28 e 29, pois os valores de $F_{\text{observado}}$ encontrados são inferiores aos valores de $F_{\text{crítico}}$. Esses resultados, também, são similares aos encontrados por Leite (2019) para a mistura de argamassa com substituição parcial do resíduo do processo de corte, pela areia (mistura RCA).

Tabela 33 – Média e desvio padrão dos resultados da massa específica saturada, aos 28 dias de cura, das misturas de argamassas realizadas, em g/cm³.

Teores	RC	RCQ	RP	RCA	RCQA
0%	2,08 ± 0,09	2,10 ± 0,08	2,08 ± 0,09	2,09 ± 0,04	2,04 ± 0,08
7,5%	2,12 ± 0,05	2,12 ± 0,03	2,11 ± 0,04	2,10 ± 0,09	2,13 ± 0,04
10%	2,13 ± 0,09	2,09 ± 0,09	2,09 ± 0,08	2,07 ± 0,09	2,08 ± 0,07
20%	2,11 ± 0,04	2,12 ± 0,05	2,13 ± 0,05	2,07 ± 0,04	2,13 ± 0,03
30%	-	-	-	2,10 ± 0,08	2,11 ± 0,05

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 34 – Análise de variância (ANOVA) da massa específica saturada das argamassas no estado endurecido, com substituição do cimento pelo RBRO para as misturas RC, RCQ e RP.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	$F_{\text{observado}}$	valor-P	$F_{\text{crítico}}$
Entre grupos	0,0060	3	0,0020	0,54	0,66	2,90
Dentro dos grupos	0,1190	32	0,0037			
Total	0,1249	35				

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 35 – Análise de variância (ANOVA) da massa específica seca das argamassas no estado endurecido, com substituição da areia pelo RBRO para as misturas RCA e RCQA.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	$F_{\text{observado}}$	valor-P	$F_{\text{crítico}}$
Entre grupos	0,0100	4	0,0025	0,693	0,604	2,759
Dentro dos grupos	0,0903	25	0,0036			
Total	0,1003	29				

Fonte: Elaborado pela autora

Correlacionando os resultados de absorção de água por imersão com os resultados de índice de vazios e apesar da similaridade estatística de todos os resultados, pode-se observar que se comportam como esperado, ou seja, quanto maior a absorção, maior índice de vazios e vice e versa para todos os corpos de prova sem ou com resíduos em todos os teores estudados tanto para as substituição pelo cimento como para a areia. Além disso, pode-se perceber, também como esperado, que todos valores de massa específica saturada são superiores aos de massa específica seca para todas as misturas estudadas.

Resumidamente, ressalta-se que as propriedades de densidade, absorção de água, índice de vazios, massa específica seca e massa específica saturada não são alteradas comparando-se as misturas de referência com as misturas com RBRO, ou seja, observa-se semelhança nas propriedades dos resíduos com o cimento e a areia que substituíram.

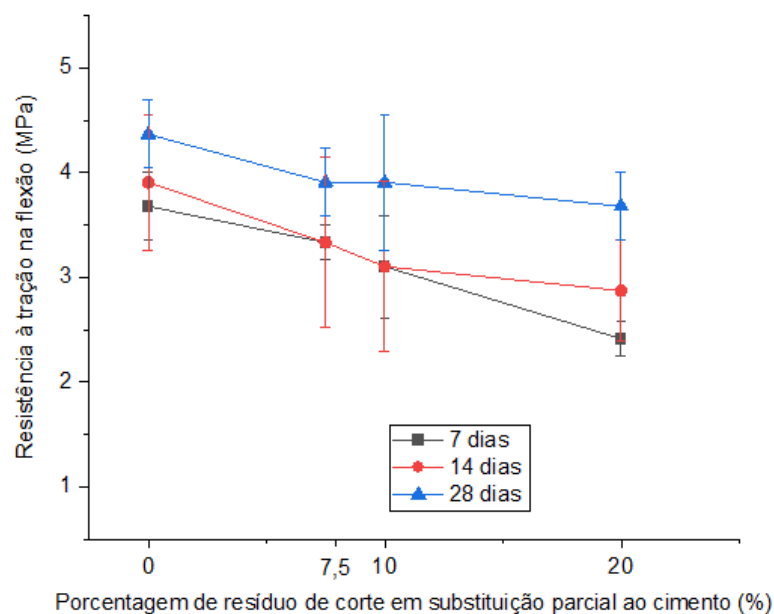
5.2.3 Resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão das argamassas

- **Misturas com substituição parcial do cimento pelos RBROs (RC, RCQ e RP)**

Os resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão para as argamassas obtidas com a substituição do cimento, misturas RC, RCQ e RP, são apresentados nas Figuras 19, 20 e 21. Observa-se analisando esses gráficos que, conforme esperado, os resultados da resistência à tração na flexão aumentam para as diferentes idades de cura (7, 14 e 28 dias), ou seja, o processo de hidratação do cimento e, conseqüente, ganho de resistência, não foi afetado pelo aumento nos teores de resíduos nas misturas.

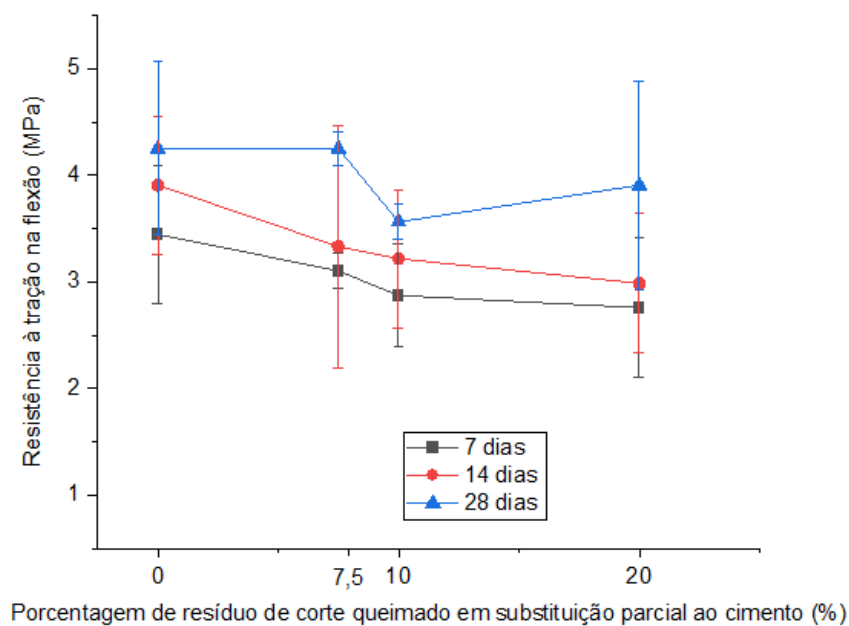
Ainda avaliando as Figuras 19, 20 e 21 pode-se notar uma sutil queda de resistência à tração na flexão, conforme esperado, uma vez que os resíduos não apresenta exatamente as mesmas características químicas do cimento conforme observados ensaios de FRX, DRX e FTIR e, possível ausência de pozolanicidade como observado em Alves (2008). E como ao substituir o cimento pelos resíduos as misturas tiveram um aumento do fator a/c (Tabela 13), esperava-se uma redução nas resistências mecânicas das misturas, como prevê a teoria. Resultados similares foram observados por Medina et. al. (2017).

Figura 20 – Resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão dos corpos de prova de argamassas, com substituição do cimento, por RBRO do processo de corte (misturas RC), em MPa



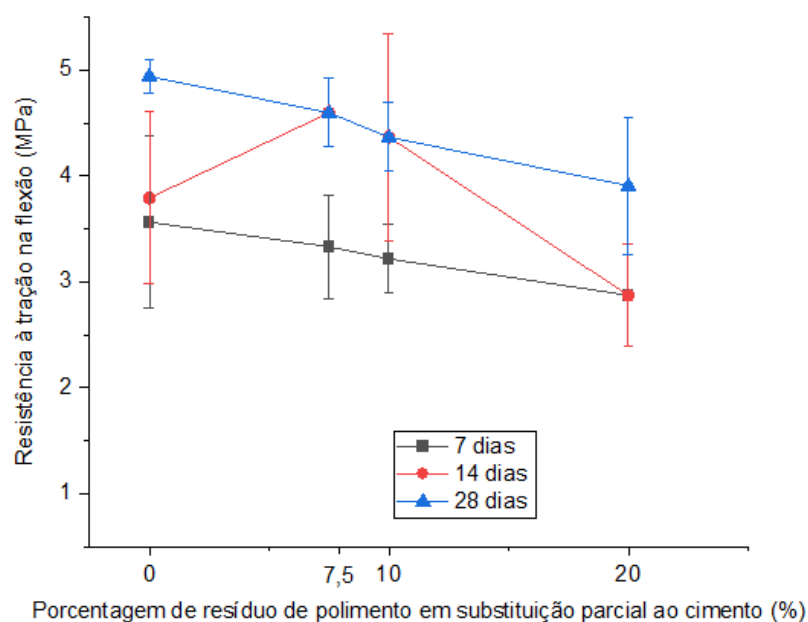
Fonte: Elaborado pela autora

Figura 21 – Resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão dos corpos de prova de argamassas, com substituição do cimento, por RBRO do processo de corte – queimado (misturas RCQ), em MPa



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 22 – Resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão dos corpos de prova de argamassas, com substituição do cimento, por RBRO do processo de polimento (misturas RP), em MPa



Fonte: Elaborado pela autora

O método ANOVA utilizado para as análises estatísticas, para os corpos de provas aos 28 dias de cura, ensaiados à resistência à tração na flexão mostra que os valores de $F_{\text{observado}}$ são inferiores aos $F_{\text{crítico}}$, indicando que não há diferença representativa entre as misturas analisadas (RC, RCQ e RP), conforme indicado na Tabela 36.

Tabela 36 – Análise de variância (ANOVA) dos ensaios de resistência à tração na flexão dos corpos de prova de argamassas, com substituição do cimento pelo RBRO (misturas RC, RCQ e RP).

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	$F_{\text{observado}}$	valor-P	$F_{\text{crítico}}$
Entre grupos	0,0033	3	0,0011	2,42	0,10	3,10
Dentro dos grupos	0,0091	20	0,0005			
Total	0,0124	23				

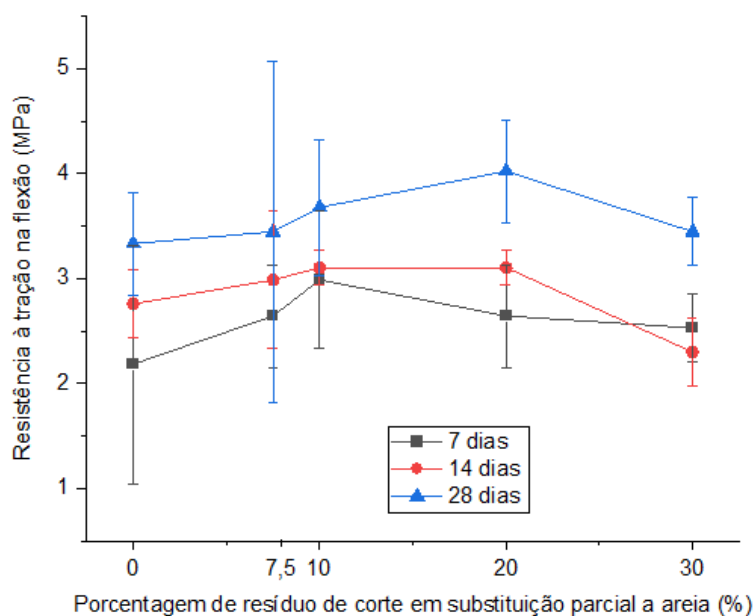
Fonte: Elaborado pela autora

Todas as misturas obtidas com a substituição do cimento, misturas RC, RCQ e RP podem ser classificadas como R5 e R6, que são as categorias mais elevadas de resistência à tração na flexão, de acordo com a norma NBR 13281 (ABNT, 2005).

- **Misturas com substituição parcial da areia pelos RBROs (RCA e RCQA)**

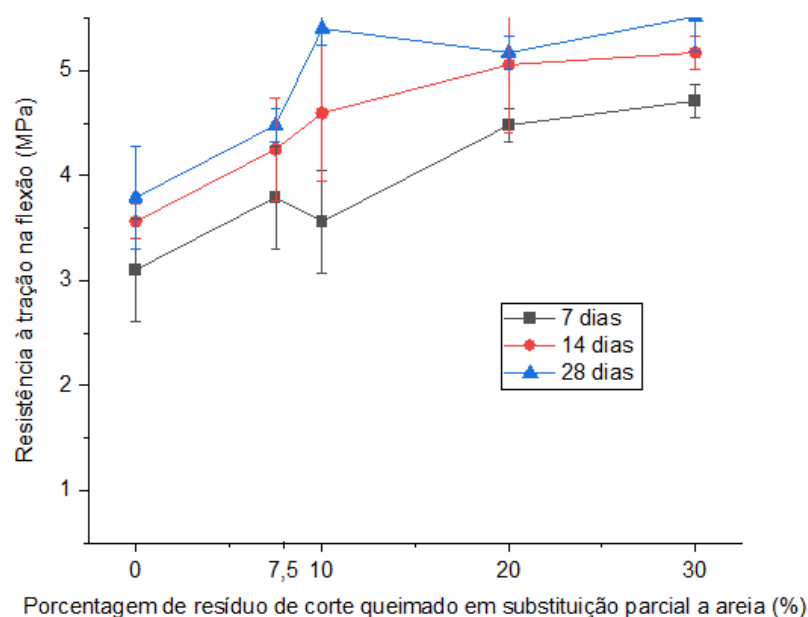
Os resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão para as argamassas obtidas com a substituição da areia pelo resíduo de corte e corte queimado (misturas RCA e RCQA) são apresentados nas Figuras 22 e 23. Observa-se analisando esses gráficos que os resultados da resistência à tração na flexão, aumentam para as diferentes idades de cura (7, 14 e 28 dias), conforme esperado, uma vez que misturas a base de cimento, com o passar do tempo de cura, apresentam aumento no grau de hidratação das mesmas aumentando suas resistências.

Figura 23 – Resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão dos corpos de prova de argamassas, com substituição da areia por RBRO do processo de corte (misturas RCA), em MPa



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 24 – Resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão dos corpos de prova de argamassas, com substituição da areia por RBRO do processo de corte – queimado (misturas RCQA), em MPa



Fonte: Elaborado pela autora

Nota-se através da análise de variância (ANOVA), para os corpos de prova aos 28 dias de cura, para todas as porcentagens (teores) das misturas RCA que os resultados não apresentam diferenças significativas para os ensaios de resistência à tração na flexão, como indica a Tabela 37 já que o valor de $F_{\text{observado}}$ é menor que o $F_{\text{crítico}}$.

Tabela 37 – Análise de variância (ANOVA) dos ensaios de resistência à tração na flexão dos corpos de prova de argamassas, com substituição da areia pelo resíduo de corte, misturas RCA.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	$F_{\text{observado}}$	valor-P	$F_{\text{crítico}}$
Entre grupos	0,0011	4	0,0003	0,21	0,92	5,19
Dentro dos grupos	0,0069	5	0,0014			
Total	0,0080	9				

Fonte: Elaborado pela autora

Observa-se por meio da ANOVA, para os corpos de prova aos 28 dias de cura, apresentada na Tabela 38, que os resultados de resistência à tração na flexão para as misturas com substituição de areia pelo resíduo de corte queimado (misturas RCQA), que o valor de $F_{\text{observado}}$ é superior ao $F_{\text{crítico}}$, mostrando que há pelo menos uma diferença significativa entre os teores de substituição estudados. Desse modo, realizou-se o Teste Tukey, que pode ser observado na Tabela 39, onde se conclui que em relação aos corpos de prova sem incorporação de resíduo (0%) o incremento da incorporação levou a um pequeno aumento dos valores de

resistência à tração na flexão, exceto a incorporação de 7,5% cuja a média é igual a mistura de referência (sem incorporação). O incremento de 7,5% do resíduo comparado ao da mistura com teor de 20%, não apresentou diferença nos valores, embora comparada aos teores de 10% e 30% se observou um aumento da resistência à tração na flexão. E, por fim, o teor de 10% comparados aos teores de 20% e 30% apresentaram-se iguais. De tal modo, que a resistência à tração na flexão é similar ou apresenta um aumento para as substituições da areia por até 30% de resíduos de corte queimado.

Tabela 38 – *Análise de variância (ANOVA) dos ensaios de resistência à tração na flexão dos corpos de prova de argamassas, com substituição da areia pelo resíduo de corte queimado, misturas RCQA.*

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F_{observado}</i>	<i>valor-P</i>	<i>F_{crítico}</i>
Entre grupos	0,0080	4	0,0020	12,44	0,01	5,19
Dentro dos grupos	0,0008	5	0,0002			
Total	0,0088	9				

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 39 – *Teste Tukey para os resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão dos corpos de prova de argamassas, com substituição da areia pelo resíduo de corte queimado, misturas RCQA.*

Comparação	$\bar{X}_a - \bar{X}_b$	D_{ms}	Conclusão
0%-7,5%	0,03	0,033	não representativo
0%-10%	0,07		representativo
0%-20%	0,06		representativo
0%-30%	0,08		representativo
7,5%-10%	0,04		representativo
7,5%-20%	0,03		não representativo
7,5%-30%	0,05		representativo
10%-20%	0,01		não representativo
10%-30%	0,01		não representativo
20%-30%	0,02		não representativo

Fonte: Elaborado pela autora

Em Lozano-Lunar (2020) et. al. o lodo de granito foi caracterizado por composição química e mineralógica se apresentando similar aos resíduos de corte e corte queimado estudados neste trabalho. Foi avaliado duas porcentagens de incorporação (20% e 40%) do volume de agregado convencional em substituição ao lodo de granito para produção de argamassas autoadensável. No estado endurecido foram ensaiadas à tração na flexão aos 7, 28 e 91 dias de cura e observou-se que do ponto de vista da engenharia, os resultados mostram a viabilidade de incorporar até 40% de lodo de granito em argamassa autoadensável. Já em Leite

(2019) o resíduo de corte empregado em porcentagens de 10%, 20% e 30% em substituição à areia, resultaram em argamassas com resistências à tração similares as misturas de referência.

As misturas podem não ter sido afetadas quanto as resistências à tração na flexão por conta do efeito fíler. Assim, conclui-se que a substituição parcial da areia pelos resíduos de corte e corte queimado mostram que as resistências à tração para os teores de até 30% são iguais ou superiores aos resultados das misturas sem resíduos (referência).

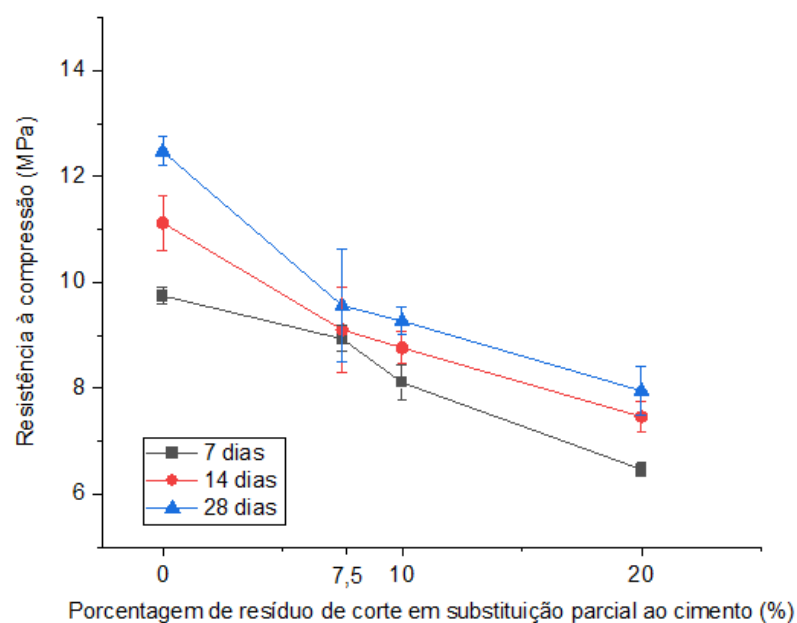
As misturas (RCA e RCQA) podem ser classificadas como R5 e R6, categorias mais elevadas de resistência, de acordo com a norma NBR 13281 (ABNT, 2005).

5.2.4 Resultados dos ensaios de resistência à compressão das argamassas

- **Misturas com substituição parcial do cimento pelos RBROs (RC, RCQ e RP)**

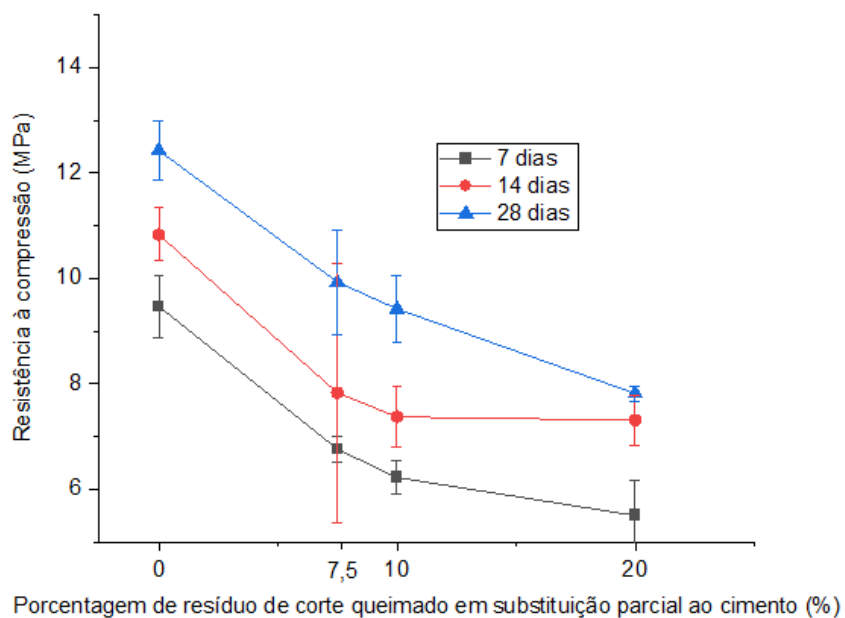
Os resultados dos ensaios de resistência à compressão para as argamassas obtidas com a substituição do cimento pelos resíduos RC, RCQ e RP são apresentados nas Figuras 24, 25 e 26, respectivamente. Observa-se analisando esses gráficos que os resultados da resistência à compressão, aumentam para as diferentes idades de cura (7, 14 e 28 dias), ou seja, o conforme o endurecimento das misturas acontece as resistências à compressão aumentaram, conforme esperado. No entanto, é possível analisar uma queda da resistência à compressão com o aumento do teor de substituição do RBRO pelo cimento. Conforme mencionado, anteriormente, os resíduos não apresentam as mesmas características químicas do cimento e como ao substituir o cimento pelos resíduos as misturas tiveram um aumento do fator a/c (Tabela 13), esperava-se uma redução nas resistências mecânicas das misturas, como prevê a teoria. Resultados similares foram observados por Medina et. al. (2017).

Figura 25 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão dos corpos de prova de argamassas, com substituição do cimento, por RBRO do processo de corte (misturas RC), em MPa



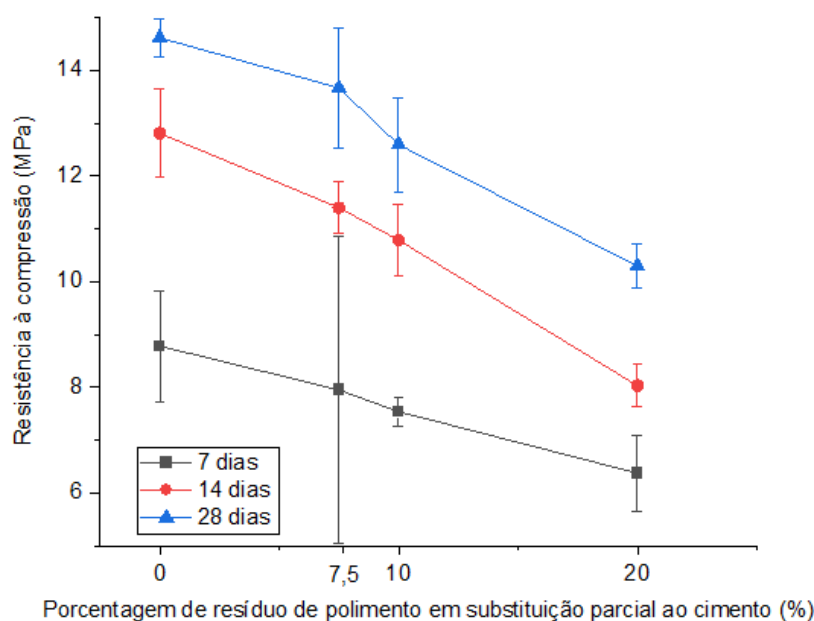
Fonte: Elaborado pela autora

Figura 26 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão dos corpos de prova de argamassas, com substituição do cimento, por RBRO do processo de corte – queimado (misturas RCQ), em MPa



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 27 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão dos corpos de prova de argamassas, com substituição do cimento, por RBRO do processo de polimento (misturas RP), em MPa



Fonte: Elaborado pela autora

A análise de variância (ANOVA) dos resultados dos ensaios de resistência à compressão, aos 28 dias de cura, para as argamassas obtidas com a substituição parcial do cimento pelo resíduo de corte (RC) são apresentados na Tabela 40 que mostra que o valor de $F_{\text{observado}}$ é bem maior que o $F_{\text{crítico}}$, e portanto, os resultados apresentam diferenças significativas. O Teste de Tukey, da Tabela 41, indicou a existência de diferenças significativas entre os ensaios de resistência à compressão das argamassas sem e com resíduo de corte, exceto para comparação entre os teores das misturas com 7,5% e 10% de resíduo. Desta forma, confirma-se que há diminuição na resistência à compressão observada na Figura 25.

Tabela 40 – Análise de variância (ANOVA) dos ensaios de resistência à compressão dos corpos de prova de argamassas, com substituição do cimento pelo resíduo de corte, misturas RC.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	$F_{\text{observado}}$	valor-P	$F_{\text{crítico}}$
Entre grupos	1,1599	3	0,3866	39,30	0,000002	3,49
Dentro dos grupos	0,1181	12	0,0098			
Total	1,2780	15				

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 41 – Teste Tukey para os resultados dos ensaios de resistência à compressão dos corpos de prova de argamassas, com substituição do cimento pelo resíduo de corte, misturas RC.

Comparação	$ \bar{X}_\alpha - \bar{X}_\beta $	D_{ms}	Conclusão
0%-7,5%	0,5	0,208	representativo
0%-10%	0,5		representativo
0%-20%	0,7		representativo
7,5%-10%	0,05		não representativo
7,5%-20%	0,3		representativo
10%-20%	0,2		representativo

Fonte: Elaborado pela autora

Na sequência é apresentado na Tabela 42 com a análise de variância dos resultados aos 28 dias de resistência à compressão dos corpos de prova de argamassas com substituição parcial do cimento pelo resíduo de corte queimado (RCQ), pode-se observar que $F_{\text{observado}}$ é maior que o $F_{\text{crítico}}$ e, portanto, o Teste Tukey foi realizado conforme apresentado na Tabela 43. Conclui-se a partir do Teste Tukey que há diferença entre a mistura de referência e os teores incorporações dos resíduos de corte queimado, mostrando que há redução da resistência à compressão à medida que se incrementa a incorporação de resíduo. Contudo, aumentar em 10% os teores não difere de incorporar 7,5%, o que possibilita que a incorporação chegue a 10%, pois o resultado será o mesmo que do que incorporar 7,5%, embora esperava-se se uma redução na resistência devido ao aumento do teor a/c das misturas. A análise do Teste Tukey ainda mostra que o aumento de incorporação de 10% e 20% em substituição do cimento, reduz a resistência à compressão, conforme esperado, já que há um aumento do fator a/c das misturas. Do mesmo modo, que para as misturas com substituição do resíduo de corte (sem queima) pelo cimento, como analisado na Tabela 41.

Tabela 42 – Análise de variância (ANOVA) dos ensaios de resistência à compressão dos corpos de prova de argamassas, com substituição do cimento pelo resíduo de corte queimado, misturas RCQ.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	$F_{\text{observado}}$	valor-P	$F_{\text{crítico}}$
Entre grupos	1,1672	3	0,3891	34,42	0,000004	3,49
Dentro dos grupos	0,1357	12	0,0113			
Total	1,3028	15				

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 43 – Teste Tukey para os resultados dos ensaios de resistência à compressão dos corpos de prova de argamassas, com substituição do cimento pelo resíduo de corte queimado, misturas RCQ.

Comparação	$ \bar{X}_a - \bar{X}_b $	D_{ms}	Conclusão
0%-7,5%	0,4	0,223	representativo
0%-10%	0,5		representativo
0%-20%	0,8		representativo
7,5%-10%	0,1		não representativo
7,5%-20%	0,3		representativo
10%-20%	0,3		representativo

Fonte: Elaborado pela autora

A análise estatística dos resultados dos ensaios de resistência à compressão para as misturas de argamassas com substituição parcial do cimento pelo resíduo de polimento realizados pelo método ANOVA, aos 28 dias de cura, pode-se observar na Tabela 44, que indica que o $F_{\text{observado}}$ é maior que $F_{\text{crítico}}$, ou seja, os resultados apresentam diferenças significativas. O Teste Tukey da Tabela 45 mostra que não há diferença estatística entre a mistura de referência comparada com a incorporação de 7,5% de resíduo de polimento em substituição parcial ao cimento. Comparando as misturas com incorporação de 7,5% com 10%, observa-se não haver diferença significativa. Porém com o aumento das porcentagens para 10% e 20% se observa uma queda da resistência à compressão significativa estatisticamente. Apresentando o mesmo comportamento das misturas com substituição parcial do cimento pelos resíduos de corte e corte queimado.

Tabela 44 – Análise de variância (ANOVA) dos ensaios de resistência à compressão dos corpos de prova de argamassas, com substituição do cimento pelo resíduo de polimento, misturas RP.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	$F_{\text{observado}}$	valor-P	$F_{\text{crítico}}$
Entre grupos	1,1037	3	0,3679	23,36	0,00003	3,49
Dentro dos grupos	0,1890	12	0,0158			
Total	1,2927	15				

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 45 – *Teste Tukey para os resultados dos ensaios de resistência à compressão dos corpos de prova de argamassas, com substituição do cimento pelo resíduo de polimento, misturas RP.*

Comparação	$ \bar{X}_a - \bar{X}_b $	D_{ms}	Conclusão
0%-7,5%	0,2	0,264	não representativo
0%-10%	0,3		representativo
0%-20%	0,7		representativo
7,5%-10%	0,18		não representativo
7,5%-20%	0,6		representativo
10%-20%	0,4		representativo

Fonte: Elaborado pela autora

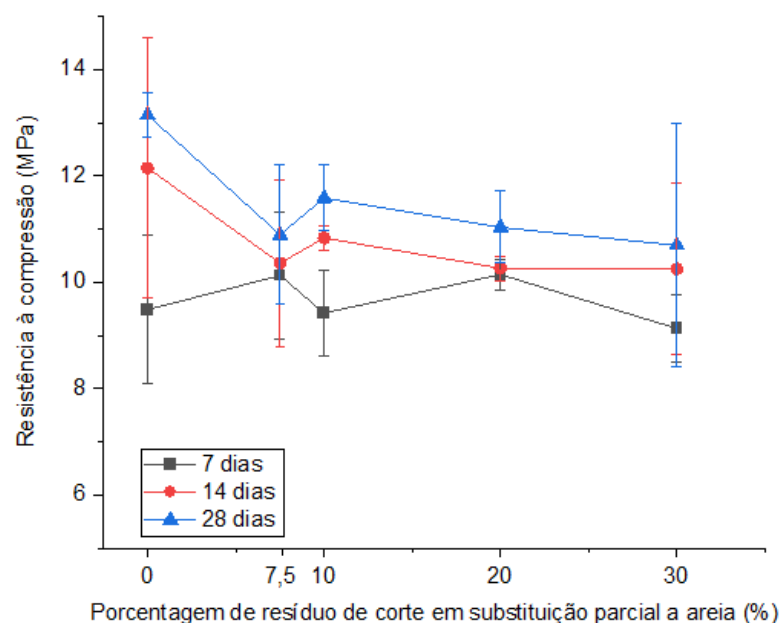
Nota-se em todas as misturas com substituição parcial do cimento pelos resíduos (misturas RC, RCQ e RP) que a resistência à compressão apresenta diminuição comparadas aos seus traços de referência, contudo, não há diferenças significativas quanto substituição de até 10% do cimento pelos resíduos, atribui-se, neste trabalho, esse desempenho ao efeito fíler. Em Gonçalves, Moura e Molin (2002) observa-se resultados análogos para misturas de concretos com substituição de até 10% para resíduo de corte.

Essas misturas podem ser classificadas como P6, categorias mais elevadas de resistência à compressão para argamassa, de acordo com a norma NBR 13281 (ABNT, 2005).

- **Misturas com substituição parcial da areia pelos RBROs (RCA e RCQA)**

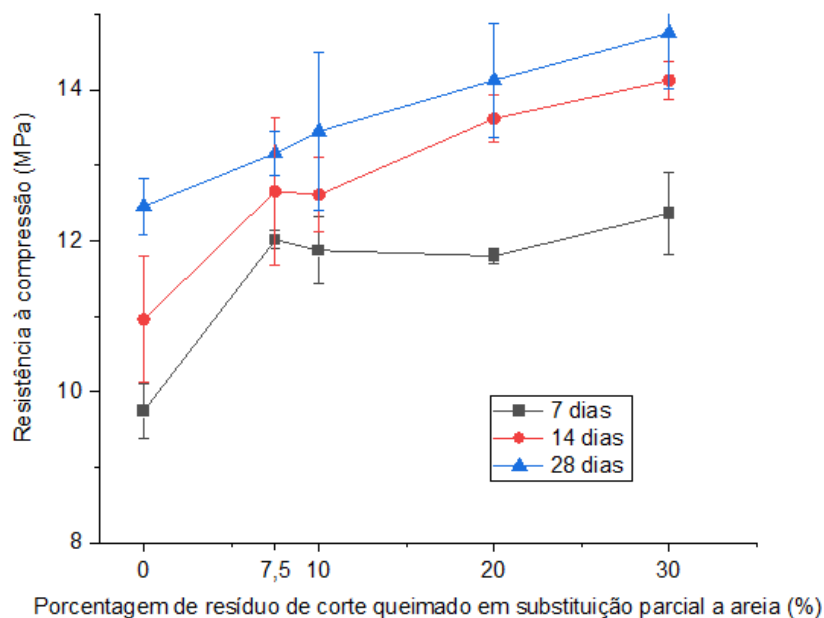
Os resultados dos ensaios de resistência à compressão para as argamassas obtidas com a substituição da areia pelo resíduo de corte e corte queimado (misturas RCA e RCQA) são apresentados nas Figuras 27 e 28. Observa-se analisando esses gráficos que os resultados da resistência à compressão, aumentam para as diferentes idades de cura (7, 14 e 28 dias), apresentando o mesmo comportamento para os resultados de resistência à tração na flexão, conforme esperado.

Figura 28 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão dos corpos de prova de argamassas, com substituição da areia por RBRO do processo de corte (misturas RCA), em MPa.



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 29 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão dos corpos de prova de argamassas, com substituição da areia por RBRO do processo de corte – queimado (misturas RCQA), em MPa



Fonte: Elaborado pela autora

Na Tabela 46 tem-se os resultados da análise estatística pelo método ANOVA mostrando que não há diferenças significativas entre os resultados de resistência à compressão aos 28 dias para as argamassas obtidas com a substituição da areia pelo resíduo de corte, já que

o $F_{\text{observado}}$ é inferior ao $F_{\text{crítico}}$. Permitindo concluir a possibilidade de substituição parcial da areia pelo resíduo de corte em até 30%.

Tabela 46 – *Análise de variância (ANOVA) dos ensaios de resistência à compressão dos corpos de prova de argamassas, com substituição da areia pelo resíduo de corte, misturas RCA.*

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F_{observado}</i>	<i>valor-P</i>	<i>F_{crítico}</i>
Entre grupos	0,4204	4	0,1051	2,48	0,08846	3,06
Dentro dos grupos	0,6355	15	0,0424			
Total	1,0559	19				

Fonte: Elaborado pela autora

A Tabela 47 apresenta os resultados de resistência à compressão para os corpos de prova com 28 dias de cura, confeccionado com substituição parcial da areia pelo resíduo de corte queimado, mistura RCQA, que indica que há pelo menos uma diferença significativa entre eles, pois o valor do $F_{\text{observado}}$ foi maior que o valor do $F_{\text{crítico}}$. Na Tabela 48 observa-se os resultados do Teste de Tukey onde é possível verificar um aumento significativo entre as médias de resistência à compressão das argamassas com 20% e 30% de resíduo e entre as argamassas com 7,5% e 30% de resíduo, ou seja, há a possibilidade de incorporação de até a 30% do resíduo, já que para as demais comparações os resultados apresentam-se iguais.

Tabela 47 – *Análise de variância (ANOVA) dos ensaios de resistência à compressão dos corpos de prova de argamassas, com substituição da areia pelo resíduo de corte queimado, misturas RCQA.*

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F_{observado}</i>	<i>valor-P</i>	<i>F_{crítico}</i>
Entre grupos	0,3336	4	0,0834	6,42	0,00323	3,06
Dentro dos grupos	0,1948	15	0,0130			
Total	0,5284	19				

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 48 – *Teste Tukey para os resultados dos ensaios de resistência à compressão dos corpos de prova de argamassas, com substituição da areia pelo resíduo de corte queimado, misturas RCQA.*

Comparação	$ \bar{X}_a - \bar{X}_b $	D_{ms}	Conclusão
0%-7,5%	0,12	0,232	não representativo
0%-10%	0,16		não representativo
0%-20%	0,27		representativo
0%-30%	0,38		representativo
7,5%-10%	0,05		não representativo
7,5%-20%	0,16		não representativo
7,5%-30%	0,26		representativo
10%-20%	0,11		não representativo
10%-30%	0,21		não representativo
20%-30%	0,10		não representativo

Fonte: Elaborado pela autora

As misturas de argamassas com substituição parcial da areia pelo RBRO (RCA e RCQA) apresentaram resultados similares aos encontrados por outros autores. Em Leite (2019) observou-se que, mesmo com o aumento das quantidades de resíduos de corte nas argamassas, a resistência à compressão não foi comprometida, para todos os teores (10%, 20% e 30%) de substituição da areia pelo resíduo de corte, análogos aos resultados das misturas RCA, deste trabalho. Em Lozano-Lunar (2020) et. al. a resistência à compressão registrou a mesma tendência que resistência à tração na flexão, mostrando pequenas perdas quando os teores de o lodo de granito aumentou nas argamassas, mas do ponto de vista mecânico, o uso de até 40% do lodo de granito como agregado convencional na produção de argamassa autoadensável seria uma alternativa viável, devido ao comportamento semelhante das misturas com 20% e 40% de substituição da areia pelo resíduo em comparação com a mistura de referência.

Observando as Figuras 27 e 28 e de posse das análises estatísticas é possível observar que os resultados de resistência à compressão das misturas RCA não são afetados pelo aumento do teor de substituição da areia pelo resíduo de corte. Já mistura RCQA apresenta um aumento ou similaridade da resistência à compressão com o aumento de teor de substituição da areia pelo resíduo de corte queimado. Considerando o exposto, atribui-se ao efeito fíler as contribuições positivas para a resistência à compressão para as argamassas com substituição da areia pelo RBRO.

As misturas (RCA e RCQA) podem ser classificadas como P6, categorias mais elevadas de resistência, de acordo com a norma NBR 13281 (ABNT, 2005).

Resumindo, o uso de todos os resíduos estudados (corte, corte queimado e de polimento) como substituição ao cimento ou a areia, resultaram em argamassas resistências à compressão elevadas. Ressalta-se que a substituição do cimento pelos resíduos é recomendada até teores de 10%. Já a substituição parcial da areia pelos resíduos de corte e corte queimado mostram que as resistências à compressão para os teores de até 30% são iguais ou superiores aos resultados das misturas sem resíduos (referência). Atribui-se os desempenhos positivos dos ensaios mecânicos realizados nas misturas com substituição do cimento até 10% e nas misturas com substituição da areia até 30% ao efeito fíler que os resíduos podem ter apresentado. Mostrando mais uma vez que os RBROs são compatíveis com os materiais que estão substituindo (cimento ou areia).

5.2.5 Classificação das argamassas segundo os ensaios de densidade aparente, resistências à tração na flexão e à compressão

De posse dos resultados apresentados nos itens 5.2.1 (densidade aparente), 5.2.3 (resistência à tração na flexão), 5.2.4 (resistência à compressão) e dos parâmetros das Tabela 6, 7 e 5, respectivamente, pode-se classificar todas as misturas de argamassa, com substituição do cimento e da areia pelos RBROs, essas classificações são apresentadas na Tabela 49.

Tabela 49 – Classificação das misturas de argamassa, com substituição do cimento e da areia pelo RBRO, segundo a NBR 13281 (ABNT, 2005).

Misturas com RBRO	R Resistência à tração na flexão (MPa)	P Resistência à compressão (MPa)	M Densidade de massa aparente no estado endurecido (kg/m ³)
RC	R5	P6	M6
RCQ	R5	P6	M6
RP	R6	P6	M6
RCA	R5	P6	M6
RCQA	R6	P6	M6
Métodos de Ensaio	ABNT NBR 13279	ABNT NBR 13280	ABNT NBR 13279

Fonte: Elaborado pela autora

6 CONCLUSÕES E OUTRAS CONSIDERAÇÕES

Das análises dos resultados obtidos para os estudos da substituição parcial do cimento e da areia por resíduos do beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO) na produção de argamassas, extraiu-se as seguintes conclusões:

- A composição química dos resíduos de beneficiamento de rochas ornamentais oriundos do processo de corte, corte queimado e do processo de polimento é principalmente de sílica, 51,7%, 48,8% e 51,7%, respectivamente. As fases mineralógicas identificadas são as estruturas de: quartzo (SiO_2), albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), microclina (KAlSi_3O_8), hematita (Fe_2O_3), muscovita ($\text{KAl}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$), dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) e calcita (CaCO_3);
- Pode-se avaliar que não houve diferenças significativas entre os resultados de absorção de água, índice de vazios, massa específica seca e massa específica saturada para todos os teores de misturas com substituição parcial do cimento ou da areia por todos os resíduos (corte, corte queimado e de polimento) indicando que o resíduo apresenta características compatíveis com o cimento e com a areia quando se observa sua granulometria e densidade;
- Os resultados dos ensaios de resistências à tração na flexão, se mostraram similares para todas as misturas de argamassas produzidas em relação as suas misturas de referência, ou seja, considerando este parâmetro os resíduos são indicados para as substituições tanto do cimento como da areia;
- Observou-se que há diminuição na resistência à compressão para todos os teores (7,5%, 10% e 20%) das misturas de argamassa com substituição parcial do cimento pelos resíduos (RC, RCQ e RP) comparadas as misturas de referência, entretanto, não há diferenças significativas quanto substituição de até 10% do cimento pelos resíduos;
- Já a substituição parcial da areia para pelos resíduos de corte e corte queimado mostram que as resistências à compressão para os teores de até 30% são iguais ou superiores aos resultados das misturas sem resíduos (referência). As misturas podem ter sido afetadas positivamente quanto as resistências à compressão por conta do efeito fíler;
- O uso de todos os resíduos estudados (corte, corte queimado e de polimento) como substituição ao cimento ou a areia, resultaram em argamassas resistências à

compressão elevadas. Ressalta-se que a substituição do cimento pelos resíduos é recomendada até teores de 10%. Já a substituição parcial da areia para pelos resíduos de corte e corte queimado mostram que as resistências à compressão para os teores de até 30% são iguais ou superiores aos resultados das misturas sem resíduos (referência). Atribui-se os desempenhos positivos dos ensaios mecânicos realizados nas misturas com substituição do cimento até 10% e nas misturas com substituição da areia até 30% ao efeito fíler que os resíduos podem ter apresentado.

- Com base nos resultados obtidos por meio dos ensaios de caracterização do RBRO, e dos ensaios de resistência à tração na flexão e à compressão dos corpos de prova de argamassa, o uso do resíduo de rochas ornamentais como substituição parcial do cimento se mostrou satisfatório. Tornando-se mais promissor e evidente nas substituições parciais da areia pelo RBRO. Indica-se para a substituição do cimento até 10% e para areia até 30% pelo resíduo.

Considerando o exposto, o uso dos resíduos estudados na produção de argamassas é uma alternativa ambientalmente correta para a destinação final deste material, já que a indústria de beneficiamento de rochas ornamentais produz uma enorme quantidade desse material, sendo descartados na maioria das vezes de forma inadequada, principalmente em aterros. Com mais estudos sobre sua aplicação, custos e aceitação técnica, pode-se criar um modelo de economia circular para o RBRO, ou seja, por exemplo, o resíduo produzido na cidade de Sorocaba, pode ser usado por construtoras para empreendimento da região, evitando assim, o descarte de uma matéria-prima com valor agregado.

De forma geral, pode-se concluir com os estudos realizados que os três tipos de resíduos (RC, RCQ e RP), têm potencial para substituir tanto o cimento com a areia na produção das argamassas.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Considerando que os três tipos de resíduos estudados (RC, RCQ e RP), têm potencial para substituir tanto o cimento com a areia na produção das argamassas, sugere-se nestes itens os trabalhos futuros:

- Realizar uma análise de custos comparando a substituição dos resíduos pelo cimento com a substituição com a areia. Embora, tenha sido apresentado que substituição parcial dos resíduos pela areia permita maior teor de substituição, até 30%, o cimento é um insumo mais caro e mais poluente que areia, portanto, qualquer substituição a ele pode trazer mais vantagens financeiras e ambientais;
- Considerando que a argamassa de assentamento deve apresentar trabalhabilidade e coesão e a argamassa de revestimento deve formar uma camada superficial de proteção ambiental, higiênica e estética das peças da alvenaria, sugere-se estudos sobre as propriedades reológicas das argamassas produzidas com as substituições de RBROs, com a realização de ensaios como: densidade de massa no estado fresco, ar incorporado na massa, retenção de água, consistência pela mesa de fluidez (flow-table) ou penetrômetros, nas argamassas no estado fresco. Sugere-se também, estudar a resistência de aderência à tração (propriedades no estado endurecido), com o objetivo de avaliar a aderência ao substrato das argamassas. Outros ensaios complementares são recomendados para se viabilizar a aplicação técnica do RBRO em argamassas, tais como: de resistência a agentes químicos, de comportamento em meio agressivo, dentre outros, de acordo com os usos a serem demandados.
- Sabe-se ainda que um outro grande problema ambiental que sociedade contemporânea enfrenta é a impermeabilização da superfície das cidades e a falta de drenagem adequada das vias urbanas, o que tem afetado o ciclo da água nas grandes cidades, levando a inundações nos centros urbanos, aumento da velocidade de escoamento das águas e, portanto, a severos desastres ambientais. Uma das alternativas para enfrentar esta problemática é utilização de concreto permeável para a pavimentação, que promete devolver ao solo uma parcela de infiltração das águas das chuvas mitigando os efeitos nocivos do excessivo escoamento superficial, desta forma, sugere-se um estudo sobre o comportamento do concreto permeável com substituição parcial do cimento por RBRO do processo de corte, no teor de até 10%.

8 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland. **A nova norma de especificação de cimento ABNT NBR 16697**: saiba o que mudou e o que não mudou. 2018. Disponível em: <https://abcp.org.br/imprensa/a-nova-norma-de-especificacao-de-cimento-abnt-nbr-16697-saiba-o-que-mudou-e-o-que-nao-mudou/>. Acesso em: 06 de dezembro de 2019.

ABIROCHAS - Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais. **Cenário Mundial**. 2017. Disponível em: http://abirochas.com.br/wp-content/uploads/2018/06/Panorama/Cenario_Mundial_2017_b.pdf. Acesso em 24/11/2018(a).

ABIROCHAS - Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais. **Produção Brasileira de Lavra**. 2019. Balanço das Exportações e Importações Brasileiras de Rochas Ornamentais em 2019. Disponível em: https://abirochas.com.br/wp-content/uploads/2020/06/Informe-01_2020-Balan%C3%A7o-2019.pdf. Acesso em 23 de junho de 2020.

ABIROCHAS - Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais. **Sector de Rochas Ornamentais**. 2018. Disponível em: https://www.abirochas.com.br/wp-content/uploads/2018/06/Informes/Informe_05_2018_Setor_de_Rochas_Ornamentais_c.pdf. Acesso em 24 de outubro de 2018(b).

ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. ABRELPE, 2019.

ALIABDO, A. A., A. E. M. ABD ELMOATY, E. M. AUDA. 2014. **Re-use of Waste Marble Dust in the Production of Cement and Concrete**. Construction and Building Materials 50: 28–41. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.09.005

ALVES, M. S. (2008). **Estudo das Características e da Viabilidade do Uso de Resíduos Gerados no Polimento de Rochas Graníticas como Adição em Concretos**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL. C1528/09. **Standard guide for selection of dimension stone for exterior use**. West Conshohocken: ASTM, 2009.

_____. C119/12: **Standard terminology relating to dimension stone**. West Conshohocken: ASTM, 2012.

ANGULO, Sérgio. **Caracterização de agregados de resíduos de Construção e Demolição Reciclados e a Influência de suas características no comportamento de concretos**. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6502. **Rochas e solos**. Rio de Janeiro: ABNT, 1995.

_____. NBR 7200: **Execução de revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.

_____. NBR 7211: **Agregados para concreto - Especificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. NBR 9778: **Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. NBR 10004: **Resíduos sólidos - Classificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

_____. NBR 10007: **Amostragem de resíduos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

_____. NBR 12653: **Materiais pozolânicos – Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

_____. NBR 13279: **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão**. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

_____. NBR 13280: **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido**. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

_____. NBR 13281: **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

_____. NBR 15012: **Rochas para revestimento de edificações – Terminologia**. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

_____. NBR 16697: **Cimento Portland – Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

_____. NM-ISO 3310-1: **Peneiras de ensaio - Requisitos técnicos e verificação** Parte 1: Peneiras de ensaio com tela de tecido metálico. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

_____. NBR NM 45: **Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios**. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

_____. NBR NM 46: **Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem**. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

_____. NBR NM 49: **Agregado miúdo - Determinação de impurezas orgânicas**. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

_____. NBR NM 248: **Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

BARBOSA, Luiz Cláudio de Almeida. **Espectroscopia no infravermelho na caracterização de compostos orgânicos**. Viçosa: UFV, 2007.

BRAGA, Florindo dos Santos; BUZZI, Daniella Cardoso; COUTO, Maria Cláudia Lima; LANGE, Liséte Celina. **Caracterização ambiental de lamas de beneficiamento de rochas ornamentais**. Eng Sanit Ambient, v.15 n.3. 2010. p 237-244

BRASIL, MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Relatório Técnico 33: Rochas Ornamentais e de Revestimento. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral**. Brasília, 2009.

BERTOLINI, Luca. **Materiais de construção: patologia, reabilitação, prevenção**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010. Capítulo 9 - Alvenaria, p194 – 211.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. BS EN 1341/2000: **Slabs of natural stone for external paving: requirements and test methods**. London: BSI, 2000.

_____. BS EN 12670/2002: **Natural stone: terminology**. London: BSI, 2002.

CAMARGOS, Caio Soares; et al. **Substituição de Areia Padrão por Resíduo de Corte de Marmoraria em Argamassa**. 60º Congresso Brasileiro do Concreto, 2018, Foz do Iguaçu/PR.

CAMPOS, Anna Carolina Fortunato; MISHIMA, Jessica Silva Prates; PINHEIRO, Monique Julio de Oliveira et al. **Avaliação do Desempenho de Concretos Obtidos com a Incorporação de Resíduos de Granito**. 60º Congresso Brasileiro do Concreto, 2018, Foz do Iguaçu/PR.

CAMPOS, A.R. et. al. **Resíduos: Tratamento e Aplicações Industriais**. In: VIDAL, Francisco W. H.; CARVALHO, Hélio A. A.; CASTRO, Nuria F. (Ed.). **TECNOLOGIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS: Pesquisa, lavra e beneficiamento**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2013. 700p.

CEMENT SUSTAINABILITY INITIATIVE. **Cement Industry Energy and CO2 Performance: “Getting the Numbers Right”**. World Business Council for Sustainable Development, 2018. Disponível em: <https://gccassociation.org/gnr/>. Acesso em: 20 jul. 2020.

CORDEIRO, G. C.; ALVARENGA, L. M. S. C., ROCHA, C. A. A. **Rheological and mechanical properties of concrete containing crushed granite fine aggregate**. Construction and Building Materials, Volume 111, 2016, Pages 766-773, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.178>.

D’AGOSTINO, Liz Zanchetta; SOARES, Lindolfo. **O uso de finos de pedreira de rocha granítico-gnáissica em substituição às areias naturais na elaboração de argamassa**. São Paulo. Geociências, v. 22, n. 1, p. 65-73, 2003

DAMINELI, B. L.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M.. **Influência do empacotamento e dispersão de partículas no consumo de cimento de concretos**. Rev. IBRACON Estrut. Mater., São Paulo, v. 10, n. 5, p. 998-1024, set. 2017. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1983-41952017000500998&lng=en&nrm=iso>. Acesso em 06 jan. 2020.

FARIAS, Lucas de S.; RIBEIRO, Jayme de M.; SOUZA, Paulo Sérgio L. **Análise da absorção do concreto reciclado com resíduo de corte de mármore e granito (RCMG) como adição**. 60º Congresso Brasileiro do Concreto, 2018, Foz do Iguaçu/PR.

FOSTER, Allan; ROBERTO Samanta Souza; IGARI, Alexandre Toshio. **Economia circular e resíduos sólidos: uma revisão sistemática sobre a eficiência ambiental e econômica**. ENGEMA. 2016.

GHORBANI, I. TAJI; BRITO, J.; NEGAHBAN, M. S. ;GHORBANI, M.; TAVAKKOLIZADEH, A. D. **Mechanical and durability behaviour of concrete with granite waste dust as partial cement replacement under adverse exposure conditions**. Constr. Build. Mater. 194 (2019) 143–152.

GONÇALVES, J. P. (2000). **Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para produção de concretos**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

GONÇALVES, Jardel Pereira; MOURA, Washington Almeida; DAL MOLIN, Denise Carpena Coitinho. **Avaliação da influência da utilização do resíduo de corte de granito (RCG), como adição, em propriedades mecânicas do concreto**. Associação Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído, 2002

GUPTA, L. Kumar; KABEER, K I Syed Ahmed; VYAS, A. Kumar. **Effect on physical and mechanical properties of cement mortar prepared with waste granite powder as secondary aggregate**. Malaviya National Institute of Technology, Jaipur, India. Crescent Institute of Science and Technology, Chennai, India. 2016.

ISAIA, G. C. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: IBRACON, 2007. 2v. 1712p.

ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011. 1v. 931p.

JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. **Reciclagem de resíduos da construção**. São Paulo, 2000.

KHYALIYA, R. K., K. I. S. A. KABEER, A. K. VYAS. 2017. **Evaluation of Strength and Durability of Lean Mortar Mixes Containing Marble Waste**. Construction and Building Materials 147: 598–607. doi:10.1016/j.conbuildmat. 2017.04.199.

LEITE, Florence Rezende (2019). **O potencial uso de resíduos de beneficiamento de rochas ornamentais como matéria-prima em argamassas e sua avaliação do ciclo de vida (ACV)**. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru.

LETT, Lina A. **Las amenazas globales, el reciclaje de residuos y el concepto de economía circular**. Global threats, waste recycling and the circular economy concept. Rev. argent. microbiol. vol.46 no.1 Ciudad Autónoma de Buenos Aires, 2014.

LI, L.G.; WANG, Y.M.; TAN, Y.P.; KWAN, A.K.H.; LI, L.J. **Adding granite dust as paste replacement to improve durability and dimensional stability of mortar**. Powder

Technology, Volume 333, 2018, Pages 269-276, ISSN 0032-5910, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.04.055>.

LOZANO -LUNAR, A., DUBCHENKO, I., BASHYNSKYI, S., RODERO, A., FERNÁNDEZ, J.M., JIMÉNEZ, J.R.. **Performance of self-compacting mortars with granite sludge as aggregate**. Construction and Building Materials, Volume 251, 2020, ISSN 09500618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118998>.

MASHALY, A. O.; EL-KALIOUBY, B. A.; SHALABY, B. N.; EL – GOHARY, A. RASHWAN, M.; M. A. **Effects of marble sludge incorporation on the properties of cement composites and concrete paving blocks**. Journal of Cleaner Production, Volume 112, Part 1, 2016, Pages 731-741, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.023>.

MEDINA, G.; SÁEZ DEL BOSQUE, I.F.; FRÍAS, M.; SÁNCHEZ DE ROJAS, M.I.; MEDINA, C. **Granite quarry waste as a future eco-efficient supplementary cementitious material (SCM): scientific and technical considerations**. J. Clean. Prod. 148 (2017) 467–476.

MELO; L. S. C. (2016). **Caracterização de compostos de cimento Portland confeccionados com resíduos do processamento a úmido de rochas ornamentais de origens distintas**. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia da UFMG. Belo Horizonte.

METHA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **CONCRETO. Microestrutura, Propriedades e Materiais**. N.P. Hasparyk. 2 ed. São Paulo, IBRACON, 2014. 782 p.

MOLNAR, L. M., D. L. MANEA. 2016. **New Types of Plastering Mortars Based on Marble Powder Slime**. Procedia Technology 22: 251–258. doi:10.1016/j.protcy.2016.01.076.

MONTANI, Carlo. XXVIII Rapporto Marmo e Pietre nel Mondo 2018. Disponível em <http://www.globalstonecongress2018.com.br/anais.htm>. Acesso em 26 nov. 2018.

NEZERKA, V et al. **Micromechanical characterization and modeling of cement pastes containing waste marble powder**: Journal of Cleaner Production. Journal of Cleaner Production. Volume 195, 10 September 2018, Pages 1081-1090

OLIVEIRA, Paulo Silas. (2017). **Caracterização do resíduo de resina epóxi com fibra de vidro proveniente da fabricação de pás eólicas e sua incorporação em argamassa de cimento Portland**. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru.

PARLAMENTO EUROPEU. **Economia circular: definição, importância e benefícios**. Dez. de 2015. Disponível em: <http://www.europarl.europa.eu/news/pt/headlines/economy/20151201STO05603/economia-circular-definicao-importancia-e-beneficios>. Acesso em 27 nov. 2018.

PEREIRA, F.R; LABRINCHA, J.A.; SEGADÃES, A.M.; HOTZA, D.; ACCHAR, W. **Resíduos industriais como alternativa a recursos minerais**. Anais...47º Congresso Brasileiro de Cerâmica. 2003. João Pessoa/ PB.

PETRUCCI, Eládio G. R. **Materiais de construção**. 10 ed. São Paulo: Globo, 1995. 435 p.

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

PIQUE, Teresa M.; VAZQUEZ, Analía. **Uso de Espectroscopía Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR) en el estudio de la hidratación del cemento**. **Concr. cem. investig. desarro**, México, v. 3, n. 2, p. 62-71, Julho 2012. Disponível em: <http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-30112012000100004&lng=en&nrm=iso>. Acesso em 30 nov. 2019.

RAITZIK, Simone. **Cabana em Tiradentes feita de pedra e madeira da região**. Revista Casa Abril, 10 de maio 2012. Disponível em <https://casa.abril.com.br/casas-apartamentos/cabana-em-tiradentes-feita-de-pedra-e-madeira-da-regiao/>. Acesso em 18 nov. 2018.

REIS, Alessandra Savazzini dos; ALVAREZ, Cristina Engel. **A sustentabilidade e o resíduo gerado no beneficiamento das rochas ornamentais**. 2007 Disponível em http://lpp.ufes.br/sites/lpp.ufes.br/files/field/anexo/2007_artigo_009.pdf. Acesso em 18 nov. 2018.

ROSSA J.;J. **Utilização de escória de alto forno como adição em argamassa colante tipo AC-I**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia – PIPE. Universidade Federal do Paraná. 2009

ROSSO, Silvana. **Mármore e granitos demandam cuidados do arquiteto desde a seleção dos produtos até a entrega da obra ao cliente**. Revista Arquitetura e Urbanismo. Edição 193, Abril de 2010. Disponível em <http://au17.pini.com.br/arquitetura-urbanismo/193/solidas-e-delicadas-rochas-ornamentais-demandam-cuidados-do-arquiteto-169514-1.aspx>. Acesso em 18 nov. 2018.

SANCAK, E., Ş. ÖZKAN. 2015. **Sodium Sulphate Effect on Cement Produced with Building Stone Waste**. Journal of Materials 2015: 1– 12. doi:10.1155/2015/813515.

SANTOS, Max M. Aguiar I; DESTEFANI, A.Z. I; HOLANDA, J.N.F. III. **Caracterização de resíduos de rochas ornamentais provenientes de diferentes processos de corte e beneficiamento**: Matéria (Rio J.) vol.18 no.4. Rio de Janeiro. Oct./Dec. 2013.

SANTOS, J. dos; GALEMBECK, F. **Caracterização de resíduos de rochas ornamentais: Aplicação de conceitos mecanoquímicos**. 22º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais 2016, Natal/ RN.

SCHEFFER; Mariana Matos; PICCININI, Ângela Costa. **Concreto de Pós Reativos com a Utilização de Escória de alto forno e Pó de Mármore**. 60º Congresso Brasileiro do Concreto, 2018, Foz do Iguaçu/PR.

SHAH, K.W.; LI, W. **A Review on Catalytic Nanomaterials for Volatile Organic Compounds VOC Removal and Their Applications for Healthy Buildings**. Nanomaterials 2019, 9, 910.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (Brasil). **Relatório anual 2013**. Rio de Janeiro, 2013. 40p.

SOLIMAN, N.M., 2013. **Effect of using marble powder in concrete mixes on the behavior and strength of R.C. slabs.** Int. J. Curr. Eng. Technol. ISSN: 2277-4106 3 (5), 1863 e 1870.

SUDARSHAN D. KORE, A. K. VYAS & SYED AHMED KABEER K.I. (2019) **A brief review on sustainable utilisation of marble waste in concrete,** *International Journal of Sustainable Engineering*, DOI: 10.1080/19397038.2019.1703151

TEIXEIRA, Fernando Ritiéle; PALIGA, Charlei Marcelo; TORRES, Ariela da Silva. **Resistência à compressão e absorção de água em concretos produzidos com substituição parcial do cimento pelo resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais.** 60º Congresso Brasileiro do Concreto, 2018, Foz do Iguaçu/PR.

TERZU, R. et al. **An analytical study of marble consolidation by oxalate precipitation using density, FTIR and powder-XRD measurements.** *Journal of Engineering & Processing Management*, [S.l.], v. 8, n. 1, p. 21-26, dec. 2016.

THAKUR, Anil Kumar; PAPPU, Asokan; THAKUR, Vijay Kumar. **Synthesis and characterization of new class of geopolymer hybrid composite materials from industrial wastes.** *Journal of Cleaner Production*. Volume 230, 1 September 2019, Pages 11-20

TOLEDO FILHO, R.D.; et. al. **Potential for use of crushed waste calcined-clay brick as a supplementary cementitious material in Brazil:** *Cement and Concrete. Research* 37. 2007.p. 1357-1365

TOLEDO, R. **Técnicas fototérmicas e de raios-x para o monitoramento de sólidos e gases em materiais cerâmicos.** Tese de Doutorado, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF, Rio de Janeiro, 2003. TOLEDO, R. **Técnicas fototérmicas e de raios-x para o monitoramento de sólidos e gases em materiais cerâmicos.** Tese de Doutorado, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF, Rio de Janeiro, 2003.

TONOLI, G. et al. **Rationalizing the impact of aging on fiber-matrix interface and stability of cement-based composites submitted to carbonation at early ages.** *Journal of Materials Science*, [s. l.], v. 51, n. 17, p. 7929–7943, 2016.

VARDHAN, Kirti; GOYAL, Shweta; SIDDIQUE, Rafat; SINGH, Malkit. **Mechanical properties and microstructural analysis of cement mortar incorporating marble powder as partial replacement of cement.** *Construction and Building Materials* 96, 2015. 615–621p.

VIDAL, Francisco W. H.; AZEVEDO, Hélio C. A.; CASTRO, Nuria F. (Eds). **Tecnologia de rochas ornamentais: pesquisa, lavra e beneficiamento.** Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2013.700p.

APÊNDICE A

1 Cimento Portland

1.1 Definição

“O cimento Portland é um cimento hidráulico produzido pela pulverização de clínques constituídos essencialmente por silicatos de cálcio hidráulicos cristalinos e uma pequena quantidade de uma ou mais formas de sulfato de cálcio e até 5% de calcário como adição na moagem.” (METHA, 2014).

Ainda, segundo Metha (2014) para a produção de cimento Portland são utilizadas como matéria prima calcário e sílica, em proporções precisas e aquecidas a altas temperaturas. São fontes industriais cálcio, calcário, giz, calcário argiloso e conchas do mar, normalmente, estas fontes apresentam como impurezas argila e dolomita ($\text{CaCO}_3\text{MgCO}_3$). As argilas, fontes para a produção silicatos de cálcio presente no cimento Portland, contêm em seus minerais alumina (Al_2O_3), óxidos de ferro (Fe_2O_3) e álcalis, que quando não estão presentes em quantidades ideais são incorporados na produção do clínquer através de matérias primas como bauxita e minério de ferro, uma vez que a presença de alumina e óxido de ferro facilitam a formação de silicatos de cálcio a temperaturas mais baixas do que outra forma.

1.2 Composição Química

As análises de cimento Portland são normalmente expressas em termos de óxidos individuais e compostos conforme as abreviações apresentadas na Tabela A1.

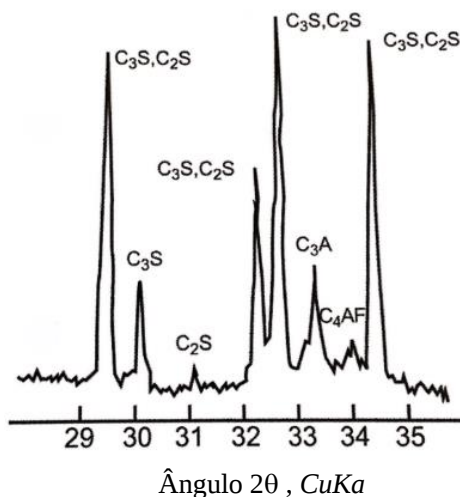
Tabela A1 – Abreviações dos óxidos individuais e compostos presentes no cimento Portland

Óxido	Abreviação	Composto	Abreviação
CaO	C	$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	C_3S
SiO_2	S	$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	C_2S
Al_2O_3	A	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Fe_2O_3	F	$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF
MgO_3	M	$4\text{CaO}\cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SO}_3$	$\text{C}_4\text{A}_3\bar{\text{S}}$
SO_3	$\bar{\text{S}}$	$3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$	$\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$
H_2O	H	$\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{C}\bar{\text{S}}\text{H}_2$

Fonte: METHA (2014)

A determinação direta destes compostos pode ser realizada, por exemplo, pela técnica de difração de raios X, através das posições dos picos presentes no gráfico é possível identificar compostos presentes na amostra de cimento Portland em pó. Na Figura A1 observa-se uma análise por difração de raios X em uma amostra de clínquer pulverizado.

Figura A1 – Difratoograma de raios X de uma amostra de clínquer pulverizado



Fonte: METHA (2014)

1.3 Tipos de cemento Portland

De acordo com a ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland, a norma de especificação do Cimento Portland (ABNT NBR 16697) foi publicada em 2018, com alterações importantes, alinhadas com tendência internacional e traz unificação em um só documento dos requisitos atualizados das antigas especificações. De todas as modificações, a que trouxe mais inovação foi a permissão de limites mais altos de teor de fíler calcário no Cimento CP II-F, essa alteração promove um alinhamento com padrões normativos internacionais, como é o caso da Argentina, do México, dos países da União Europeia, e atendem os direcionamentos da Agência Internacional de Energia (IEA) e da Iniciativa pela Sustentabilidade do Cimento (CSI), que incentivam a adoção de alternativas ou tecnologias mais avançadas para diminuir emissões de CO₂.

Na Tabela A2 apresenta-se segundo a NBR 16697 (ABNT, 2018) as designações normalizadas, siglas e classe do cimento Portland no Brasil.

Tabela A2 – Designação normalizada, sigla e classe do cimento Portland

Designação normalizada (tipo)	Subtipo	Sigla	Classe de resistência	Sufixo
Cimento Portland comum	Sem adição	CP I	25,32 ou 40 ^c	RS ^a ou BC ^b -
	Com adição	CP I - S		
Cimento Portland composto	Com escória granulada de alto forno	CP II-E		
	Com material carbonático	CP II-F		
	Com material pozolânico	CP II-Z		
Cimento Portland de alto-forno		CP III		
Cimento Portland pozolânico		CP IV		
Cimento Portland de alta resistência inicial		CP V	ARI ^d	
Cimento Portland branco	Estrutural	CPB	25,32 ou 40 ^c	
	Não estrutural	CPB	-	-

^a O sufixo RS significa resistente a sulfatos e se aplica a qualquer tipo de cimento Portland que atenda aos requisitos estabelecidos em 5.3, além dos requisitos para seu tipo e classe originais.

^b O sufixo BC significa baixo calor de hidratação e se aplica a qualquer tipo de cimento Portland que atenda aos requisitos estabelecidos em 5.4, além dos requisitos para seu tipo e classe originais.

^c As classes 25, 32 e 40 representam os mínimos de resistência à compressão aos 28 dias de idade, em megapascals (MPa), conforme método de ensaio estabelecido pela ABNT 7215.

^d Cimento Portland de alta resistência inicial, CP V, que apresenta a 1 dia de idade resistência igual ou maior que 14MPa, quando ensaiado de acordo com ABNT 7215 e atende aos demais requisitos estabelecidos nesta Norma para este tipo de cimento.

Fonte: NBR 16697 (ABNT, 2018)

O cimento Portland composto (CP II) é o tipo de cimento mais produzido no Brasil, conforme a Tabela A3, podendo ser utilizado desde estruturas de concreto armado a argamassas de assentamento e revestimento, entre outras aplicações.

Tabela A3 – Produção anual do cimento Portland, segundos os tipos (em 1.000 toneladas).

ANO	CP I	CP II	CP III	CP IV	CP V
2008	346	33.080	8.879	5.714	3.577
2009	84	34.662	7.967	5.097	3.377
2010	88	38.474	8.345	6.686	4.211
2011	103	38.659	9.347	8.247	4.973
2012	98	39.743	10.000	9.612	5.580
2013	263	41.249	9.405	9.863	5.660

Fonte: Adaptado de Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (2013).

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 residuo.

Fonte: Pimentel Gomes (1987)