

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP

“JÚLIO MESQUITA FILHO”

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS
POSMAT**

BEATRIZ DE FRANÇA PASOTI

**CHAPAS CIMENTÍCIAS COM A INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS
DO PROCESSAMENTO DE PEDRAS ORNAMENTAIS**

PRESIDENTE PRUDENTE

2020

BEATRIZ DE FRANÇA PASOTI

**CHAPAS CIMENTÍCIAS COM A INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DO
PROCESSAMENTO DE PEDRAS ORNAMENTAIS**

Dissertação apresentada como requisito para a obtenção do título de Mestre à Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais, área de concentração Ciência e Tecnologia de Materiais, sob a Orientação do Prof. Dr. Aldo Eloizo Job.

PRESIDENTE PRUDENTE

2020

P283c

Pasoti, Beatriz de França

Chapas Cimentícias com a incorporação de resíduos do
processamento de pedras ornamentais / Beatriz de França Pasoti. --
Presidente Prudente, 2020

112 p. : il., tabs., fotos

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente

Orientador: Aldo Eloiso Job

1. Rochas ornamentais. 2. Resíduos. 3. Cimento. I. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE BEATRIZ DE FRANÇA PASOTI, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS, DA FACULDADE DE CIÊNCIAS - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 29 dias do mês de julho do ano de 2020, às 14:00 horas, no(a) por videoconferência, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. ALDO ELOIZO JOB - Orientador(a) do(a) Departamento de Física / Faculdade de Ciências e Tecnologia - UNESP - Presidente Prudente, Profa. Dra. PRISCILA ALESSIO CONSTANTINO do(a) Departamento de Física / Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente, Prof. Dr. ELTON APARECIDO PRADO DOS REIS do(a) Toledo / Toledo Centro Universitário, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de BEATRIZ DE FRANÇA PASOTI, intitulada **CHAPAS CIMENTÍCIAS COM A INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DO PROCESSAMENTO DE PEDRAS 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.

Prof. Dr. ALDO ELOIZO JOB

Profa. Dra. PRISCILA ALESSIO CONSTANTINO

Prof. Dr. ELTON APARECIDO PRADO DOS REIS

Dedico este trabalho aos meus queridos pais, Valéria Pasoti e Marlei Pasoti, que me mostraram que não devemos desistir de nossos sonhos, independente das dificuldades.

AGRADECIMENTOS

- A Deus, que me trilhou por caminhos que eu desconhecia e hoje me propicia com conquistas que provam que sonhos podem se tornar realidade.

- Aos meus pais, Valéria Pasoti e Marlei Pasoti, meu irmão, André Luís Pasoti, meu namorado, Rodrigo Magalhães Gonçalves, e toda minha família, que sempre me auxiliaram e torceram por mim para a realização deste sonho.

- Ao Prof. Dr. Aldo Eloizo Job, pela orientação, amizade e confiança que sempre teve em mim.

- Aos Professores Drs. que compuseram a banca examinadora de defesa pela grande contribuição prestada para a melhoria deste trabalho.

- Ao Dr. Silvio Rainha, pela liberação de utilização dos equipamentos do Laboratório de Materiais Cerâmicos. - Ao Prof. Guilherme Crepaldi Camarini, por disponibilizar o laboratório de Construção Civil na Universidade do Oeste Paulista.

- A microscopista Glenda pelo grande auxílio prestado na utilização do equipamento de Microscopia Eletrônica de varredura.

- Ao meu amigo e engenheiro, José Augusto, pelo grande auxílio e companheirismo na realização de diversas atividades.

- A todos os professores do programa POSMAT pela colaboração, durante o desenvolvimento deste trabalho.

- Aos professores, técnicos e colegas do Departamento de Física, Química e Biologia do campus de Presidente Prudente da UNESP.

- A empresa pelo fornecimento do resíduo de marmoraria.

- Aos demais colegas pelo apoio.

- Aos técnicos de laboratório que me ajudaram e me auxiliaram nos ensaios feitos.

“Seja você quem for, seja qual for a posição social que você tenha na vida, a mais alta ou a mais baixa, tenha sempre como meta muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito amor e com muita fé em Deus, que um dia você chega lá. De alguma maneira você chega lá.”

Ayrton Senna

RESUMO

Os Resíduos de marmorarias têm papel importante no certame do desenvolvimento. São consideravelmente impactantes ao meio ambiente, com descarte ineficiente em aterros de inertes ou mesmo nos lixões, e ainda assim com um alto custo. As propriedades físico químicas do Resíduo de Processamento de Pedras Ornamentais (RPPO) indicam potencial na produção de chapas cimentícias, substituindo parcialmente agregados inertes tradicionais (areias). Os resíduos gerados pelo corte das rochas ornamentais apresentam potencial para a coesão dos agregados. A proposta desse trabalho é a fabricação de chapas de resíduo-cimento para vedação. Nas chapas foram utilizadas diferentes incorporações de RPPO sendo elas de 10, 15 e 20% em substituição da areia natural, além do aglomerante hidráulico, cimento Portland, e água. Os materiais foram caracterizados e analisados. As técnicas de caracterização utilizadas, como fluorescência de raios-X, difração de raios-X, microscopia eletrônica de varredura – MEV, espectroscopia de energia dispersiva – EDS, microscopia óptica e análises granulométricas, identificaram os elementos constituintes do resíduo, tais como a presença de óxido de silício (SiO_2), elemento predominante na areia. Segundo os resultados obtidos por meio dos ensaios propostos e realizados para as chapas, todas as análises apresentaram efeitos positivos e vantajosos para a utilização do resíduo do processamento de pedras ornamentais em parcelas de substituições da areia na argamassa.

Palavras-chave: Resíduos do Processamento de Pedras Ornamentais. Chapas Cimentícias. Reaproveitamento de resíduo.

ABSTRACT

Marble waste plays an important role in the development certificate. They are considerably impacting the environment, with inefficient disposal in inert landfills or even in dumps, and yet at a high cost. As physical chemical properties of the ornamental stone processing residue (RPPO), they can cause potential production of cement sheets, replacing traditional aggregate aggregates (sands). The residues generated by cutting ornamental stones have the potential for aggregate cohesion. The purpose of this work is to manufacture sheets of cement residue for sealing. In the layers different types of RPPO were used, 10, 15 and 20% replacing natural sand, in addition to hydraulic binder, Portland cement and water. The materials were characterized and analyzed. Characterization techniques used, such as X-ray fluorescence, X-ray diffraction, scanning electron microscopy - SEM, dispersive energy spectroscopy - EDS, optical microscopy and particle size statistics, identified as the constituent components of the waste, such as presence of silicon oxide (SiO_2), a predominant element in sand. The results obtained by means of tests proposed and carried out for layers, all as analyzes of positive and advantageous effects for the use of the residue of the processing of ornamental stones in sand substitution plots in the sand.

Keywords: Ornamental Stones Processing Residues. Cement Plates. Reuse of waste.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Pilar esculpido em Gobekli Tepe.	25
Figura 2 - Templo de arenito de Philae.	25
Figura 3 – Paredes em Chapas Cimentícia.	32
Figura 4 – Diferentes modelos de Chapa Cimentícia.	33
Figura 5 – Aparelho de análise de fluorescência de raios-X.	39
Figura 6 – Aparelho de análise de Difração de raios-X.	39
Figura 7 - Mesa vibratória com o conjunto de peneiras da ABNT.	40
Figura 8 - (A) areia. (B) RPPO.	41
Figura 9 - (A) Bandejas com a quantidade das massas de areia retidas em cada peneira. (B) Bandejas com a quantidade das massas de RPPO retidas em cada peneira.	41
Figura 10 - (A) Amostra de cimento CPV-ARI destinada ao ensaio granulométrico. (B) Massa do cimento após ser passado na peneira 200.....	42
Figura 11 - (A) Massa da areia para iniciar o ensaio. (B) Massa do RPPO para iniciar o ensaio. (C) Massa do cimento CPV-ARI para iniciar o ensaio.....	44
Figura 12 - (A) 500 gramas de areia no frasco de 500 ml. (B) 500 gramas de RPPO no frasco de 500 ml. (C) 500 gramas de cimento CPV-ARI no frasco de 500 ml (Picnomêtro).....	44
Figura 13 - (A) Massa de areia após o ensaio de densidade, destinada a secagem em estufa. (B) Massa de RPPO após o ensaio de densidade, destinada a secagem em estufa. (C) Massa de cimento após a secagem em estufa por 24 horas.	45
Figura 14 – (A) Massa da areia após o ensaio e a secagem. (B) Massa do RPPO após o ensaio e a secagem. (C) Massa do cimento CPV-ARI após o ensaio e a secagem.....	45
Figura 15 - (A) Areia no Frasco de Chapman. (B) RPPO no Frasco de Chapman. (C) Cimento CPV-ARI no Frasco de Chapman.	46
Figura 16 - (A) Massa do cimento destinado ao ensaio de densidade. (B) Frasco de Le Chatelier com a quantidade de água exigida para o ensaio. (C) Frasco de Le Chatelier com a água e a massa de cimento.....	47
Figura 17 - Amostras banhadas no ouro sobre fitas de carbono.	48
Figura 18 - Equipamento de Análise de Microscopia Eletrônica de Varredura.	48
Figura 19 - Microscópio Zeiss Discovery V.12.	49
Figura 20 - (A) Mistura dos compósitos e acréscimo de água. (B) Quantidade de água totalmente adicionada. (C) Massa pronta para as moldagens.	53
Figura 21: (A) Massa dentro do cone. (B) Cone retirado. (C) Massa após os 30 golpes no ensaio de consistência para argamassa.	54
Figura 22: Chapa Cimentícia na forma.	54
Figura 23: Chapa Cimentícia desenformada com idade de 7 dias.	54
Figura 24: Chapa Cimentícia com idade de 28 dias imersas em água.	55
Figura 25 – (A) Chapa Cimentícia seca em estufa. (B) Chapas Cimentícias imersas em água. (C) Chapa Cimentícia após a imersão.	56
Figura 26 – Desenho esquemático do ensaio de permeabilidade.....	56
Figura 27 – Cachimbo com água e fixado na chapa cimentícia.....	57
Figura 28 – Pesagem da chapa cimentícia imersa em água.	58
Figura 29 – Esquema demonstrativo do ensaio de Impacto.	59
Figura 30 – Demonstração das posições adequadas dos componentes do ensaio.....	59
Figura 31 - (A) Chapa lado 1, com os orifícios nos 4 quadrantes. (B) Chapa lado 2, com os orifícios nos 4 quadrantes.....	61
Figura 32 - Caixa térmica de isopor revestida de madeira mdp.....	61
Figura 33 - Placa com os termopares fixos.	62

Figura 34 - (A) Caixa distribuidora dos termopares. (B) Notebook com o software térmico. (C) Termômetro com temperatura externa e interna da caixa térmica.	62
Figura 35 - Caixa térmica completa.	63
Figura 36 - (a) Ensaio Térmico; (b) Ensaio Acústico.....	64
Figura 37 - Vedação da placa com vaselina.	64
Figura 38 - Difração de raios-X do RPPO.	67
Figura 39 - Difração de raios-X da areia natural.	68
Figura 40 - Difração de raios-X da areia natural.....	69
Figura 41 - Curvas Granulométricas das amostras e das argamassas.....	74
Figura 42 - MEV da areia natural de rio com ampliação de 100x.....	78
Figura 43 - MEV do cimento CPV-ARI com ampliação de 1000x.....	78
Figura 44 - MEV do cimento CPV-ARI com ampliação de 4000x.	79
Figura 45 - MEV do RPPO com ampliação de 1000x.....	79
Figura 46 - MEV do RPPO com ampliação de 4000x.....	80
Figura 47 - EDS da Areia.....	81
Figura 48 - EDS do Cimento CPV-ARI.....	81
Figura 49 - EDS do RPPO.....	81
Figura 50 - Definição da forma estrutural da areia por meio da composição química detectada no EDS dessa amostra.....	82
Figura 51 - Definição da forma estrutural do cimento por meio da composição química detectada no EDS dessa amostra.....	82
Figura 52 - Definição da forma estrutural do RPPO por meio da composição química detectada no EDS dessa amostra.....	83
Figura 53 - MEV da chapa com 0% de RPPO, ampliação de (A) 100x; (B) 4000x. ...	83
Figura 54 - MEV da chapa com 10% de RPPO, ampliação de (A) 100x; (B) 4000x. .	84
Figura 55 - MEV da chapa com 15% de RPPO, ampliação de (A) 100x; (B) 4000x. .	84
Figura 56 - MEV da chapa com 20% de RPPO, ampliação de (A) 100x; (B) 4000x. .	85
Figura 57 - (A) Ampliação de 25x dos grãos de areia. (B) Ampliação de 100x do cimento CPV-ARI. (C) Ampliação de 100x do RPPO.	87
Figura 58 - Interação da chapa de 0% de RPPO – Piloto.	87
Figura 59 - Interação das chapas de 10, 15 e 20% de RPPO.....	88
Figura 60 - Gráfico linear de absorção de água das chapas e Desvio padrão.	90
Figura 61 - Gráfico de barras com a quantidade de água absorvidas por cada chapa. .	92
Figura 62 - Chapa cimentícia após o ensaio de permeabilidade.	93
Figura 63 - Ilustração das massas específicas.	94
Figura 64 - Representação linear dos índices de vazios das chapas.	96
Figura 65 - Ruptura da chapa cimentícia ao sofrer os impactos ao corpo duro.	97
Figura 66 - Chapa cimentícia com alterações superficiais.	97
Figura 67 - Curvas térmicas da chapa Piloto (0% de RPPO).....	99
Figura 68 - Curvas térmicas da chapa com 10% de RPPO.....	99
Figura 69 - Curvas térmicas da chapa com 15% de RPPO.....	100
Figura 70 - Curvas térmicas da chapa com 20% de RPPO.....	100
Figura 71 - Termopares e quadrantes.....	102
Figura 72 - Resultados acústicos das chapas piloto (0% de RPPO).	104
Figura 73 - Resultados acústicos das chapas com 10% de RPPO.....	104
Figura 74 - Resultados acústicos das chapas com 15% de RPPO.....	105
Figura 75 - Resultados acústicos das chapas com 20% de RPPO.....	105

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Ensaio realizados.	36
Tabela 2 – Composições dos corpos de provas em teor volumétrico.....	50
Tabela 3 – Composições dos corpos de provas em massa.....	50
Tabela 4 – Massa unitária dos agregados e aglomerante.....	51
Tabela 5 – Índice de Vazio dos agregados e aglomerante.	51
Tabela 6 – Porcentagens entre a razão de dois elementos da argamassa.....	52
Tabela 7 – Cronologia da produção e cura dos corpos de provas.	52
Tabela 8 – Composição em massa (%) das amostras de RPPO, areia e cimento.....	65
Tabela 9 – Granulometria do RPPO.	70
Tabela 10 – Granulometria da areia.....	71
Tabela 11 – Granulometria do cimento CPV-ARI.	71
Tabela 12 – Granulometria da argamassa piloto.	72
Tabela 13 – Granulometria da argamassa com cimento, 90% de areia e 10% de RPPO.	72
Tabela 14 – Granulometria da argamassa com cimento, 85% de areia e 15 % de RPPO.	73
Tabela 15 – Granulometria da argamassa com cimento, 80% de areia e 20% de RPPO.	73
Tabela 16 – Consumo de aglomerante em porcentagem.	75
Tabela 17 – Massas específicas dos agregados e do aglomerante.....	76
Tabela 18 – Absorção de água das chapas (%) – Média – Desvio Padrão.	89
Tabela 19 – Quantidade de água absorvida por cada chapa, em ml.	92
Tabela 20 – Massas específicas das chapas cimentícias.	94
Tabela 21 – Índices de vazios das chapas cimentícias.....	95
Tabela 22 – Condutividades e Resistências térmicas de cada placa.....	98
Tabela 23 – Dados acústicos gerados.	103
Tabela 24 – Resultados acústico.....	103

ÍNDICE DE FLUXOGRAMAS

Fluxograma 1 – Etapas iniciais para a fabricação das chapas.	38
--	----

LISTA DE SIGLAS

ABCP – Associação Brasileira de Cimento

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas Portland

AF – Alto forno

Al_2O_3 – Óxido de Alumínio

ANM – Agência Nacional de mineração

ARI – Alta Resistência Inicial

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

BC – Baixo calor de hidratação

CL - Cloro

CO – Monóxido de Carbono

CO₂ - Gás Carbônico

CP – Cimento Portland

CP – Corpo de Prova

CPI – Cimento Portland Comum

CPI-S – Cimento Portland Comum com adição

CPII-E – Cimento Portland Composto com escória

CPII-F – Cimento Portland Composto com fíler

CPII-Z - Cimento Portland Composto com pozolana

CPIII – Cimento Portland de Alto-Forno

CPIV – Cimento Portland pozolânico

CPV-ARI – Cimento Portland de Alta Resistência Inicial

CPB – Cimento Portland Branco

Cu - Cobre

Dm – Densidade específica ótica máxima de fumaça

DNER – Departamento Nacional de Estrada e Rodagem

DRX – Difração de raio-x

EDS – *Energy dispersive spectroscopy* (espectroscopia de energia dispersiva de raio-X)

EM – *Comité Europeo de normalizacion*

ETA – Estação de tratamento de água

Fe₂O₃ – Óxido de Ferro

FRX – Fluorescência de raio-x

H₂O – Oxigênio

ISO – *International Organization for Standardization*

Ka – Constante de acidez

LaMaC – Laboratório de Materiais Cerâmicos

LTC – Laboratório Técnico de Construção

MGR – Mármore e Granito

MEV – microscopia eletrônica de varredura

Na₂O – Óxido de Sódio

NBR – Norma brasileira

NM - Mercosul

O₂ - Oxigênio

PIB – Produto Interno Bruto

PDF – Powder Diffraction Files

POZ – Pozolânico

RMGR – Resíduo de Mármore e Granito

RPPO – Resíduo do Processamento de Pedras Ornamentais

RS – Resistência à sulfatos

SBI – *Single burning item*

SISNAMA – Sistema Nacional do Meio Ambiente

SiO₂ – Dióxido de Silício

SNVS – Sistema Nacional de Vigilância Sanitária

SO₃ – Óxido Sulfúrico

SP – São Paulo

SPT – Sondagem de simples reconhecimento de solos

UNESP – Universidade Estadual Paulista

UNOESTE – Universidade do Oeste Paulista

LISTA DE SÍMBOLOS

AA – Absorção de água

Å - Angstrom Sign.

A – Área

C – Fator de correção da peneira utilizada no ensaio

cal/g – Calorias por gramas

cm - Centímetros

cm³ - Centímetros cúbicos

e - Espessura

F – Índice de finura do cimento

EI – Energia de Impacto

Fc – Carga máxima aplicada

Ff – Carga aplicada verticalmente no centro do prisma

g - Grama

g/cm³ - Grama por centímetros cúbicos

Ip – Índice de propagação superficial de chama

J – Joule

K - Kelvin

kg – Quilograma

kg/hectares – Quilograma por hectares

kg/m² - Quilograma por metro quadrado

kg/m³ - Quilograma por metro cubico

km – Quilômetro

kN – Quilo Newton

M – Massa inicial do cimento

m² - Metro quadrado

m³ - Metro cúbico

mg - Miligrama

mL – Mililitro

mm – Milímetros

Mpa - Megapascal

ms – Massa da amostra na condição saturada superfície seca

Ms – Massa do corpo de prova seco

m/s² - Metro por segundo ao quadrado

m².K/w – metro quadrado vezes kelvin por watt

Mu – Massa do corpo de prova úmido

m₁ - Massa do conjunto

m₂ - Massa total

n – Número inteiro

N.m- Newton vezes metro

q – Fluxo de calor

R – Resíduo do cimento na peneira 200

Rc – Resistência à compressão

Rf – Resistência à tração na flexão

R – Resistencia térmica

s – Segundos

s – Superfície efetiva de peneiramento

S_d – Solicitação de cálculo

S_{gk} – Valor característico da solicitação às cargas permanentes

S_{qk} – Valor característico da solicitação devido às cargas acidentais

V – Volume do frasco

W - watt

~ - Aquilo que

λ – Comprimento de onda

λ – Condutividade térmica

Δm – Variação da massa do corpo de prova

ΔT – Variação de temperatura

: - Proporção

Φ_g - Valor reduzido da carga permanente

Φ_q - Valor reduzido da carga acidental

° - Grau

°C – Grau Celsius

°/min – Grau por minuto

° - Ordem

§ – Paragrafo

δ_a – Massa específica da água

- Abertura da peneira

θ – Ângulo de incidência do feixe de raio-x

x – Incógnita

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	22
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	24
2.1	<i>Resíduos do Processamento de Pedras Ornamentais (RPPO)</i>	24
2.1.1	História	24
2.1.2	Legislação	26
2.1.2.1	Mineração	26
2.1.2.2	Resíduos Sólidos	27
2.1.2.3	Classificação atual das rochas ornamentais	27
2.1.3	Utilizações e aplicações das rochas ornamentais	28
2.2	<i>Cimentos Portland</i>	28
2.2.1	Tipos de cimento Portland (NBRs)	28
2.2.2	Propriedades dos Cimentos Portland	29
2.2.2.1	Propriedades físicas do Cimento Portland	29
2.2.2.2	Propriedades químicas do Cimento Portland	30
2.3	<i>Areia natural</i>	31
2.4	<i>Chapas Cimentícias</i>	31
2.5	<i>Desempenho de vedações verticais</i>	33
3	OBJETIVOS	35
4	MATERIAIS E MÉTODOS	36
4.1	<i>Seleção de ensaios</i>	36
4.2	<i>Materiais</i>	36
4.2.1	Resíduos do Processamento de Pedras Ornamentais (RPPO)	36
4.2.2	Cimentos, agregados e adições	37
4.2.3	Chapas Cimentícias	37
4.3	<i>Métodos</i>	37
4.3.1	Etapa preliminar de fabricação das chapas	38
4.3.1.1	Caracterização	38
4.3.1.2	Traço para as chapas de resíduo-cimento	49
4.3.2	Etapa de confecção das chapas	52
4.3.3	Etapa de aceitação do produto (caracterização)	55
4.3.3.1	Ensaio das chapas	55
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	65
6	CONCLUSÃO	108
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109

1 INTRODUÇÃO

O pó residual de marmorarias tem sido uma grande preocupação tanto para o poder público quanto para a sociedade. Sua deposição inadequada causa resultados negativos, como a infertilidade do solo, poluição dos rios, doenças respiratórias, dentre outras; As novidades com aspecto sustentável estão, cada vez mais, ampliando sua atuação no mercado global. A produção mundial de rochas ornamentais e de revestimento cresceu de 1,8 milhões de toneladas por ano, na década de 1920, para 152 milhões de toneladas até 2019. Cerca de 58 milhões de toneladas de rochas brutas e beneficiadas foram comercializadas em 2017 no mercado internacional [1].

A construção civil é a maior responsável pelo consumo de recursos naturais, mas ao mesmo tempo é a área que mais está reutilizando os resíduos gerados, incorporando-os em novos produtos e gerando, assim, maior economia e desenvolvimento sustentável. A China se destaca como o país que mais produz essas rochas e o Brasil assume a quinta posição no cenário mundial [2].

Embora haja vários estudos envolvendo a reciclagem de resíduos para fins de construção civil, muitas pesquisas ainda precisam ser desenvolvidas com o objetivo de se obter informações sobre o comportamento e as propriedades destes materiais ao longo do tempo, inclusive buscando o aprimoramento das técnicas de reciclagem. Este entendimento possibilitará estabelecer a real relação entre reciclagem, desempenho tecnológico e ecológico, contribuindo na busca por desenvolvimento sustentável, comparando-o em fundamentos científicos [3].

A destinação final dos resíduos num modo geral, está sendo um dos maiores problemas enfrentados nos dias de hoje. Nos últimos anos, independentemente de razões econômicas, políticas ou ecológicas, a reciclagem tem sido incentivada em todo o mundo, e sem dúvida é a melhor alternativa para reduzir o impacto ambiental gerado com o consumo de matérias-primas e consequentemente a produção de resíduos [3].

A ONU (Organização das Nações Unidas) realizou em 1972, a primeira grande reunião de Estocolmo, com a presença de 113 chefes de estado e 250 instituições governamentais e não governamentais apresentando o tema sustentabilidade. Em 1987, na Comissão de Brundtland, apresentaram o documento intitulado Nosso Futuro Comum - Our Common Future. No Rio de Janeiro em 1992, também conhecida como ECO-92, foi criado a Agenda 21 onde cada país definiu seu conjunto de resoluções com o objetivo de proteger as gerações futuras, o mesmo se deu em 2012 na Rio+20 com o tema “O futuro que queremos” [4,5,6].

Os Sistemas de Vedações Verticais Internas e Externas (SVVIE), é trabalhado pela ABNT NBR 15.575/2013 - parte 4, e podem ser definidos como as partes da edificação que limitam verticalmente a edificação e seus ambientes, como as fachadas, paredes ou divisórias internas.

Com tudo isso, a pesquisa visa solucionar essa problemática do resíduo de processamento de pedras ornamentais aplicando-o no setor da construção civil, podendo diminuir o seu descarte em locais inapropriados além de, ter um novo produtor no mercado científico com efeitos positivos e vantajosos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Resíduos do Processamento de Pedras Ornamentais (RPPO)

As rochas ornamentais são muito utilizadas em função estrutural e decorativa (revestimento principalmente). No Brasil, em termos de produção, o granitos e o mármore são significativos, com 60% e 20%, respectivamente. O mármore é um calcário metamórfico cristalino, essencialmente constituído por calcita (CaCO_3) e o granito é uma rocha ígnea, constituída principalmente por feldspatos, quartzo e micas. De modo geral, os resíduos de mármore e granito apresentam comportamento não plástico devido a sua composição, assemelhando-se aos materiais cerâmicos tradicionais. Os elementos químicos predominantes nesses resíduos aparecem em forma de óxidos, como a sílica e a Alumina, junto com o cálcio e os óxidos alcalinos [7].

Moreira et al. em 2003, caracterizaram os resíduos provenientes do beneficiamento do mármore e afirmou que são constituídos principalmente por Sílica, Microclina, grupo de feldspato, Albita, Ilita/mica e Calcita. Ainda, encontrou indícios da presença de dolomita e hematita [8].

Corinaldesi et al. 2010, concluíram que devido ao elevado aspecto fino, o pó de mármore provou ser capaz de promover coesão às argamassas e aos concretos, mesmo com adição de superplastificante, desde que a relação água/cimento fosse suficientemente baixa [9].

2.1.1 História

A utilização das rochas ornamentais acompanha a evolução da humanidade, onde nos tempos antigos serviam para marcar a cultura e costumes dos povos da época. Graças a sua perenidade as rochas existem à aproximadamente 4,5 bilhões de anos, enquanto o homem moderno à 100.000 anos. Os homens escolheram as rochas ornamentais para construir estruturas de templos religiosos, pois durariam além de suas vidas, até a civilização. Nos antepassados foram fabricados os primeiros produtos com sílex e quartzito.

A primeira construção em rochas foi o Templo de Gobekli Tepe, no sudoeste da Turquia, a construção apresenta 12.000 anos, estruturas circulares ou ovais, como também colunas de calcário com 3 à 6 metros de altura, em formato “T”, como ilustra a Figura 1 [10].

No antigo Egito as rochas mais utilizadas para as construções dos Templos e Pirâmides, eram: calcário, arenito, anidrita e gesso (a Figura 2 mostrará um Templo de arenito) [11].

Já na Grécia, as rochas começaram a serem utilizadas mais tarde, os gregos faziam uso do mármore, destacando os Tassos e Naxos. Os romanos juntaram as técnicas dos gregos e egípcios, acrescentando o concreto e a argamassa, obtendo bons resultados de durabilidade e

assim, fizeram vários registros nessas rochas modificadas. No século XIX, as rochas passaram a serem menos utilizadas por causa da revolução industrial, onde predominou a utilização do concreto e dos metais. Já no século XX, as rochas voltaram a serem utilizadas com o avanço da tecnologia, na fabricação de chapas de pedras, que eram destinadas ao revestimento, e essa produção continua até os dias de hoje, concorrendo com os vidros e cerâmicas [12].

Figura 1 - Pilar esculpido em Gobekli Tepe.



Fonte: Tecnologia de rochas ornamentais - pesquisa, lavra, e beneficiamento (2014, p. 17).

Figura 2 - Templo de arenito de Philae.



Fonte: *Ancient Egyptian quarries – an illustrated overview* (2009, p. 14).

Na Europa, as rochas foram mais utilizadas. Já no Brasil e em toda a América, a utilização iniciou no período Colonial e vem até os dias de hoje, com diferentes funções [13].

O tipo de rocha utilizada em cada construção varia de acordo com a região, pois se a região apresentar predominância de uma determinada rocha, ela será, além de mais utilizada, a mais barata e de fácil acesso [14].

A produção de mármore e granito no Brasil reflete muito nas condições econômicas e sociais do País. O Brasil começou a exportar em 1980 e 1990, blocos de mármore para a Itália, devido a nossa grande produção, e com isso se tornou o sexto País com a maior exportação de rochas minerais, vindo atrás apenas da Itália, China, Índia, Espanha e Portugal. A produção de rochas ornamentais no Brasil chega à 5 milhões de toneladas por ano, e a exportação já atinge cerca de 1,1 milhões de toneladas por ano, deixando o País no grupo dos maiores produtores e exportadores do mundo. O Brasil possui uma riqueza notável, com cerca de 500 variedades de rochas comerciais, além de uma grande riqueza de recursos naturais, com 1300 pedreiras ativas. As rochas que mais se destacam são: mármore, granito, quartzo, ardósia, travertino, pedra-sabão, basalto, serpentinite, conglomerado, pedra talco, Miracema, cariri e morisca. [15].

2.1.2 Legislação

A mineração altera muito as características do Meio Ambiente, independente do seu processo de lavra [16].

No artigo 225, §§1º e 2º, da Constituição Federal de 1988, determina que as áreas degradadas sejam recuperadas, para que as atividades exploratórias possam continuar com sua função econômica e social, senão chegará uma hora em que não haverá mais o que ser explorado. Mas essa recuperação é difícil e onerosa [17].

Além da recuperação das áreas degradadas, o monitoramento Ambiental, manejo de águas em minas e relações com a comunidade [18]. Os resíduos gerados pelas rochas ornamentais nas marmorarias, devem ser depositados em aterros próprios, para não danificar o Meio Ambiente, pois não se degeneram.

2.1.2.1 Mineração

Os pilares da economia estadual são: a produção e transformação mineral, que nada mais é do que a exploração mineral. O PIB – Produto Interno Bruto tem grande parcela de participação nessa atividade. A exploração mineral gera muitas oportunidades de empregos, além de aumentar o saldo comercial que, principalmente no ano de 2017 no estado de São Paulo, gerou 63,83% ou cerca de 50 mil empregos [19].

O principal estado minerador do País é Minas Gerais, produzindo muito ouro, ferro, nióbio, zinco, fosfato, calcário e outros. Minas é responsável por aproximadamente 53% da produção de minérios em geral [20].

2.1.2.2 Resíduos Sólidos

São prioridades no gerenciamento de resíduos sólidos, a não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.

Incumbe aos Estados:

I – Gerar integração do planejamento, da organização e execução das funções públicas de interesse comum;

II – Fiscalizar e controlar os geradores de resíduos sólidos, sujeitos a licenciamentos ambientais.

A importação de resíduos sólidos perigosos e rejeitos é proibida, bem como os que causam danos à saúde pública, ao meio ambiente, aos animais e vegetais, eles devem ser tratados, reformados, reutilizados e recuperados. O desenvolvimento industrial no País, poderá acarretar sérios danos ao meio ambiente, com a geração de uma grande massa de resíduos sólidos, causando degradação ambiental [21]. Destacando a crescente atividade minerária, o meio ambiente está sujeito à muitos danos, chegando a serem até irreversíveis. Daí se dá a importância em se estudar novas possibilidades de reutilização.

2.1.2.3 Classificação atual das rochas ornamentais

As rochas ornamentais podem ser:

Rochas ígneas: resultam da solidificação de materiais rochosos, totalmente ou parcialmente fundidos, encontrados no interior da crosta terrestre, são compostas por materiais silicáticos (quartzo);

Rochas sedimentares: são formadas por meio da erosão, deposição e transporte de sedimentos (calcário);

Rochas metamórficas: são rochas formadas de outras já existentes, que sofrem mudanças mineralógicas, estrutural e química, em seu estado sólido (gnaisse) [14].

A ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), define na norma NBR 15012 (2013), rochas ornamentais como: “material pétreo natural, utilizado em revestimento interno ou externo, estruturas, elementos de composição arquitetônica, decoração, mobiliário e arte funerária.” Já as rochas para revestimento como, “rocha ornamental submetida à diferentes graus ou tipos de beneficiamento e utilizada no revestimento de superfícies, especialmente pisos, paredes e fachadas.” [22].

2.1.3 Utilizações e aplicações das rochas ornamentais

As rochas apresentam uma ótima durabilidade, resistência e dão aspecto de luxuosidade nas construções, além de apresentarem uma variedade enorme de aplicações, dependendo apenas do profissional usar a criatividade. Já os resíduos das rochas ornamentais são utilizados para outros fins, como por exemplo, a incorporação no concreto e na argamassa, sendo importantes para a fabricação de vários produtos da construção civil, como blocos, revestimentos, massas de assentamento, dentre outros [23].

Os resíduos de marmoraria num modo geral são muito utilizados na indústria de cerâmica vermelha (lajotas, telhas e tijolos), em blocos estruturais, cerâmica, piso para pavimentação e argamassas. Assim, já que essa matéria-prima é gerada em grande quantidade, a sua utilização para a produção de elementos é essencial para diminuir a deposição no meio ambiente, portanto se deu a necessidade de criar mais um produto com a incorporação do mesmo.

2.2 Cimentos Portland

O cimento Portland é o material de construção mais utilizado no mundo, é composto por clínquer e adições. As matérias primas do clínquer (principal componente em todos os cimentos) são: calcário e argila; E das adições (varia de um cimento para outro) são: gessos, escórias de alto forno, materiais pozolânicos e carbonáticos.

2.2.1 Tipos de cimento Portland (NBRs)

De acordo com a Associação Brasileira de Cimento Portland, destacam-se 8 tipos de cimentos no Brasil, garantindo uma grande variedade para todo o tipo de obra, tais como:

Cimento Portland Comum CPI e CPI-5;

Cimento Portland CPII;

Cimento Portland de Alto Forno CPIII (com escória);

Cimento Portland CPIV (com pozolânica);

Cimento Portland CPV ARI (Alta resistência inicial);

Cimento Portland CP (RS) (Resistência à sulfatos);

Cimento Portland de Baixo calor de hidratação (BC);

Cimento Portland Branco (CPB) [24].

O Cimento Portland de alta resistência inicial é obtido por meio da moagem do clínquer Portland, constituído a maior parte de silicato de cálcio hidráulico, onde forma-se um aglomerante hidráulico que atende as exigências de alta resistência inicial.

É muito importante estudar a dosagem ideal de água e cimento para a argamassa e o concreto, devido essas adições influenciarem em diferentes comportamentos dessas massas. Além, de ser necessário fazer também um correto adensamento para evitar problemas como a baixa resistência, o aparecimento de trincas e fissuras.

2.2.2 Propriedades dos Cimentos Portland

2.2.2.1 Propriedades físicas do Cimento Portland

As propriedades físicas do cimento Portland são:

- Propriedades do cimento puro (pó);
- Propriedades da mistura do cimento com água (pasta);
- Propriedades da mistura da pasta de cimento com agregados padronizados (argamassa).

- Densidade: $\left\{ \begin{array}{l} \text{Absoluta: 3,15} \\ \text{Aparente: 1,5} \end{array} \right.$

- Finura: definida pelo tamanho do grão. Com o aumento da finura desses grãos, o concreto melhora a resistência, diminui a exsudação, aumenta a impermeabilidade, a trabalhabilidade e a coesão entre os agregados.

- Exsudação: é a separação da água na mistura, onde os grãos de cimento mais densos se sedimentam por gravidade.
- Trabalhabilidade: é a maior ou menor facilidade de manuseio da argamassa ou do concreto fresco.
- Pega: consiste na evolução das propriedades mecânicas no processo de endurecimento.
- Resistência: é determinada pela ruptura, por meio da compressão dos corpos de provas [25].

2.2.2.2 Propriedades químicas do Cimento Portland

As propriedades químicas do cimento estão ligadas ao:

- Endurecimento por hidratação: esse processo ocorre de forma rápida quando o clínquer é apenas pulverizado. O alumínio tri-cálcico é o principal responsável pelo início do processo de endurecimento.
- Estabilidade: está relacionada com as indesejáveis expansões volumétricas que ocorrem logo após ao endurecimento de concreto. Esse processo é feito por autoclave, onde a pasta de cimento é acelerada para endurecer rapidamente em temperaturas elevadas.
- Calor de hidratação: aparece no concreto através de seu endurecimento, gerando uma energia térmica, e assim elevando a sua temperatura, podendo originar as trincas de contração quando o mesmo esfriar.
- Resistência aos produtos químicos: esse fenômeno de agressividade pode ocorrer quando o concreto entra em contato com a água e com a terra que apresentam substâncias químicas.
- Reação Álcali-Agregado: é a formação de produtos gelatinosos com a expansão do volume da combinação dos álcalis do cimento com a sílica ativa [26].

2.3 Areia natural

Rochas e minerais são os elementos que compõe a areia, principalmente quartzo, mas dependendo da composição das rochas originárias, pode-se aparecer também feldspato, mica, zircão, magnetita, ilmenita, monazita, cassiterita, entre outros [27].

Por conta das exigências ambientais, a areia natural é o componente do concreto e da argamassa que mais tem dificuldade em manter a produção ou extração. Além de apresentar um frete elevado para o seu transporte, pois os areais cada vez mais se afastam de centros consumidores, tornando assim o frete mais caro do que o produto.

Com isso a areia reutilizada, reciclada, (por exemplo, a areia de fundição), vem tomando conta do mercado, pois suas fabricas são próximas dos centros de concretos ou de obras. Os donos dessas fabricas estão cada vez mais adquirindo tecnologia para se destacar no setor com boa distribuição granulométrica e baixo teor de material pulverulento, procurando chegar o mais próximo da areia natural, que permitiria a sua substituição total.

As vantagens em utilizar a areia artificial estão na qualidade de vida útil da construção, além da escassez que a areia natural está enfrentando. A diferença entre ambas está apenas na granulometria.

A areia representa cerca de 30% do volume do concreto e da argamassa. Dada a escassez desse recurso, sua extração natural, ao longo do tempo, ficará insustentável [28]. Por isso, vem se tendo cada vez mais a necessidade de substituir esse bem natural escasso e precioso.

2.4 Chapas Cimentícias

As chapas cimentícias são compostas por uma mistura homogênea de cimento Portland, agregados naturais e aditivos quando necessários. E quando impermeabilizada, a massa recebe um tratamento adicional com produto impermeabilizante que deixa a chapa protegida [29].

As chapas cimentícias podem ser usadas tanto em ambientes internos quanto externos, mas possuem uma grande vantagem em serem utilizadas em ambientes externos, pois apresentam um desempenho térmico excelente, podendo isolar mais o calor em comparados

com a cerâmica. São pré-moldadas e podem ser encontradas em diferentes formatos e medidas, o seu processo de cura ajuda a eliminar os riscos de trincas e dilatações [30].

Na grande maioria são resistentes à agentes intemperes externos, como chuva, vento, sol e neve, assim assumindo ótimas condições a serem utilizadas nas fachadas das construções, como mostra a Figura 3 abaixo:

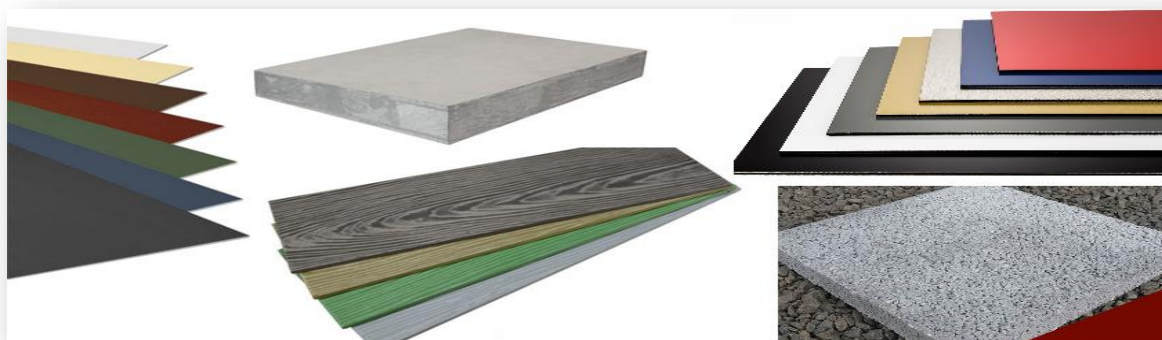
Figura 3 – Paredes em Chapas Cimentícia.



Fonte: https://www.aecweb.com.br/cont/m/rev/chapas-cimenticias-sao-solucao-para-fachadas_16344_10_8 (2019).

Essas chapas possuem grande durabilidade, resistência à impacto e não sofrem ataque de micro-organismos. E podem ser instaladas tanto em locais secos quanto úmidos, pois recebem um processo de impermeabilização. Garantem um ótimo acabamento estético final, facilitando a pintura ou a aplicação de cerâmicas e texturas, e muitas vezes pode ser o próprio acabamento, gerando economia na obra. A aplicação é rápida e simples. É incombustível, resistente à umidade, não gera desperdícios e podem receber, em seu interior, instalações elétricas e hidráulicas, quando utilizadas para revestimento [31]. As chapas podem apresentar várias dimensões, formatos, cores, acabamentos, texturas, facilitando sua aplicação e gerando economia para o cliente, como mostra a Figura 4:

Figura 4 – Diferentes modelos de Chapa Cimentícia.



Fonte: Google Imagens (2019). – Modificadas pelo autor.

2.5 Desempenho de vedações verticais

Cada vez mais há a necessidade de considerar e avaliar o desempenho, sustentabilidade, eficiência, manutenção e vida útil das edificações residenciais de até seis pavimentos.

A NBR 15575/2013, tem o foco no comportamento e uso dos elementos dos sistemas de edifícios, atendendo aos requisitos dos usuários, independentemente dos materiais constituintes e do sistema construtivo utilizado.

Essa normatização [32] é dividida em cinco sistemas diferentes, sendo: vedação, cobertura, estrutura, sistemas hidros-sanitários e pisos.

Na parte 1 desta norma, define os requisitos qualitativos e critérios quantitativos em função das exigências dos usuários.

Os SVVIE (Sistemas de Vedações Verticais Internas e Externas) compõem-se quanto à volumetria, à divisão dos espaços e aos demais elementos da construção, sendo agente influenciador no desempenho da edificação habitacional. Exercendo ainda funções como estanqueidade à água, isolamento térmico e acústico, capacidade de fixação de peças suspensas, dentre outros. Com relação ao desempenho térmico, a ABNT NBR 15.575/2013 - parte 4 estabelece que as paredes externas devem apresentar transmitância térmica e capacidade térmica que promovam desempenho térmico mínimo para cada zona bioclimática estabelecida na ABNT NBR 15220-3.

Esse sistema apresenta observações quanto à abertura para ventilação, devendo ser atendidas para proporcionar ventilação interna aos ambientes.

A ABNT NBR 15.575/2013 - parte 4 define também requisitos e critérios para a verificação do isolamento acústico entre os ambientes externo e interno, unidades autônomas, dependência e áreas comuns, devendo atender à níveis de ruídos permitidos na habitação.

3 OBJETIVOS

Objetivo Geral:

Analisar os efeitos da incorporação do pó residual de marmoraria, proveniente do acabamento e manufatura de rochas, como mármore, granito e ardósia, em chapas cimentícias, substituindo uma parcela de areia natural de rios por meio de uma metodologia de planejamento fatorial de experimentos.

Objetivos Específicos:

- Analisar o efeito do pó residual de marmoraria nas propriedades químicas, físicas, térmicas e acústicas das chapas cimentícias.
- Estudar a interação do resíduo com o cimento e a areia.
- Identificar a melhor proporção de substituição da areia pelo RPPO e não utilizar superplastificante para adequação de propriedades do produto final.
- Verificar o atendimento do produto final de acordo com as normas técnicas brasileiras quanto ao seu uso e durabilidade.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados e a metodologia realizada são descritos a seguir:

4.1 Seleção de ensaios

A Tabela 1 abaixo mostrará os ensaios realizados nos respectivos agregados, aglomerante e corpo de prova:

Tabela 1 – Ensaios realizados.

Ensaios:	Areia	Cimento	Resíduo	Chapa Cimentícia
Fluorescência de raios-X	X	X	X	-
Difração de raios-X	X	X	X	-
Curva granulométrica	X	X	X	-
Massa específica	X	X	X	X
Absorção de água	-	-	-	X
Índice de vazios	X	X	X	X
Microscopia eletrônica de varredura	X	X	X	X
Microscopia óptica	X	X	X	X
Condutividade térmica	-	-	-	X
Atenuação sonora	-	-	-	X
Impacto ao corpo duro	-	-	-	X
Permeabilidade	-	-	-	X

Fonte: próprio autor (2019).

4.2 Materiais

4.2.1 Resíduos do Processamento de Pedras Ornamentais (RPPO)

Os resíduos utilizados são provenientes das marmorarias de Presidente Prudente, estado de São Paulo.

São caracterizados visualmente como uma lama à base de água e pó resultantes dos cortes das rochas ornamentais. Para serem utilizados na pesquisa, foram secos em uma estufa à 100°C, por cerca de 72 horas.

Posteriormente, foi realizado o peneiramento manual para eliminar os grãos com diâmetros superiores a 4,8 mm. Para não receber umidade, todo o material foi guardado em baldes com tampa e sacos pretos.

O resíduo é constituído de uma mistura de rochas ornamentais, podendo destacar em parcelas maiores o granito e o mármore, pois são as rochas mais encontradas no comércio da região onde a pesquisa foi feita.

4.2.2 Cimentos, agregados e adições

Neste experimento a matriz do compósito foi o cimento Portland de alta resistência inicial (CP-V ARI), cujo fabricante é a empresa Holcim S.A. do Brasil, e areia natural de rio, lavada, comercializada pela empresa Minutti da cidade de Adamantina – SP.

Foi utilizado o mesmo lote de cimento e areia para a fabricação das amostras, para evitar as variações químicas e não afetar o comportamento mecânico dos corpos de provas.

4.2.3 Chapas Cimentícias

As chapas fabricadas foram à base de água, cimento, areia de rio e RPPO em 4 proporções, sendo 0, 10, 15 e 20% em substituição da areia pelo resíduo. Foram moldadas em fôrmas quadradas de metal, com dimensões 19 cm x 19 cm, com espessura de 2 cm, onde o tamanho ideal não é estipulado pela norma, é exigido apenas uma espessura máxima de 3 cm.

Ficaram nas fôrmas por 7 dias, período escolhido baseado em tentativas através da execução de testes, e imersas em um tanque com água por 28 dias, pois a argamassa cimentícia tem mais chance de apresentar melhores desempenhos mecânicos, térmicos e acústicos quando a sua perda de água é mínima, seja por sucção (base) ou por evaporação (superfície) [33].

A escolha da cura em água se deu devido à necessidade de perder o mínimo de água possível e evitar a retração por causa da hidratação do cimento. O processo de hidratação do cimento nada mais é do que a sua reação com a água, e assim, quanto maior a presença de água, ou seja, perder menos água possível, a sua hidratação é mais eficaz podendo garantir melhores características para a argamassa produzida, além da escolha de seguir o método de cura utilizado pelo autor Topçu et al. [34], levando 28 dias imerso em água.

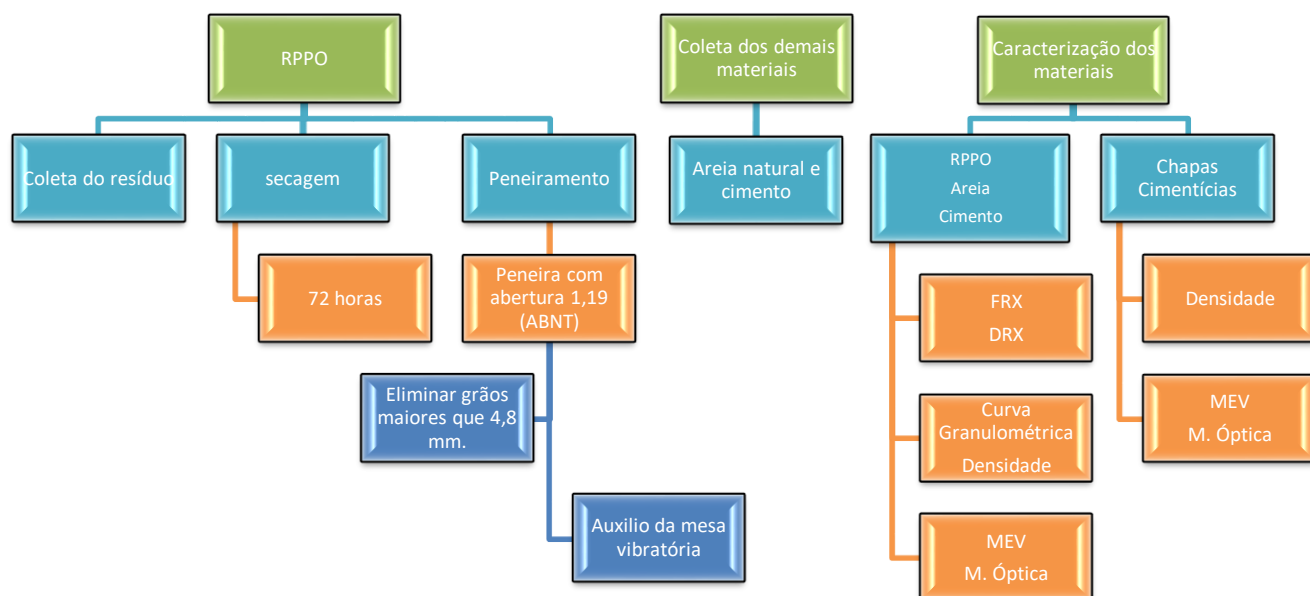
As chapas foram utilizadas para ensaios de atenuação acústica, térmica, impacto, absorção, permeabilidade, densidade, microscopia eletrônica de varredura e óptica.

4.3 Métodos

A execução foi subdividida em três grandes grupos: a etapa preliminar, que destina-se a caracterização dos materiais utilizados e definição do traço que foi estudado; a etapa de confecção das chapas; chegando a última etapa que refere-se a aceitação do produto final, através de uma sequência de ensaios normatizados a nível nacional e internacional que visam a validação final da hipótese proposta neste trabalho através de uma extensa discussão e análise dos resultados encontrados.

4.3.1 Etapa preliminar de fabricação das chapas

Fluxograma 1 – Etapas iniciais para a fabricação das chapas.



Fonte: próprio autor (2020).

4.3.1.1 Caracterização

Química

Os ensaios químicos são muito utilizados para resolver problemas e obter qualidade das amostras, focando na caracterização, identificação e quantificação de componentes, monômeros, aditivos, impurezas residuais e solventes.

• Fluorescência de raios-X (FRX)

O ensaio de Fluorescência de Raios-X seguiu à norma internacional que fornece um desenvolvimento e descreve os processos que são usados para um ensaio de Espectrometria de raios-x de comprimento de onda, onde analisa os elementos sólidos, minérios e materiais relacionados [35].

Os ensaios do cimento, areia e RPPO, foram realizados no LaMaC - Laboratório de Materiais Cerâmicos, localizado no Departamento de Física da FCT-UNESP. Os espectros de fluorescência de raios-X foram obtidos utilizando o equipamento XRF-700 (modelo Shimadzu), como mostra a Figura 5, determinando assim a composição química das amostras.

Figura 5 – Aparelho de análise de fluorescência de raios-X.



Fonte: Google imagens (2019).

- Difração de raios-X (DRX)

O ensaio de Difração de raio-X foi feito baseado na Lei de Bragg, utilizando um aparelho chamado difratômetro, como mostra a Figura 6, onde uma amostra recebe a incidência de raios-X, e apresenta registros gráficos como resultados (difratogramas) [36].

As matérias-primas utilizadas (cimento, areia e RPPO) foram analisadas usando um difratômetro da marca Shimadzu modelo DRX-6000 e fonte de radiação Cu- $K\alpha$ – $\lambda \sim 1,54 \text{ \AA}$ (radiação característica) em uma varredura angular de 10 até 90° (2 θ). Os difratogramas foram identificados utilizando o software Search-Match® e o banco de dados PDF (Powder Diffraction Files), disponível no Departamento de Física da FCT-UNESP, LaMaC Laboratório de Materiais Cerâmicos

Figura 6 – Aparelho de análise de Difração de raios-X.



Fonte: próprio autor (2019).

Física

Por meio dos ensaios físicos pode-se fazer o controle de qualidade e especificações dos materiais, avaliando propriedades que afetam diretamente tanto o processamento quanto a aplicação final da peça ou produto.

- Curva Granulométrica

A curva granulométrica é apresentada em um gráfico criado a partir do ensaio tecnológico de peneiramento da amostra, onde os variados tamanhos dos grãos passam por uma vibração e são transferidos de peneira em peneira, de acordo com a abertura da malha de cada uma, e assim obtém a massa retida e a massa passante.

As Curvas Granulométricas do RPPO e da areia foram feitas conforme a norma NM 248 – 2012 [37]. Deve-se secar a amostra em uma estufa, deixa-la esfriar à temperatura ambiente, e determinar suas massa 1 e 2, reservando-as separadamente. Assim, as peneiras devem ser todas encaixadas, formando um conjunto, com a abertura da malha em ordem crescente da base para o topo, as Figuras 7, 8 e 9 à seguir mostram os processos do ensaio:

Figura 7- Mesa vibratória com o conjunto de peneiras da ABNT.



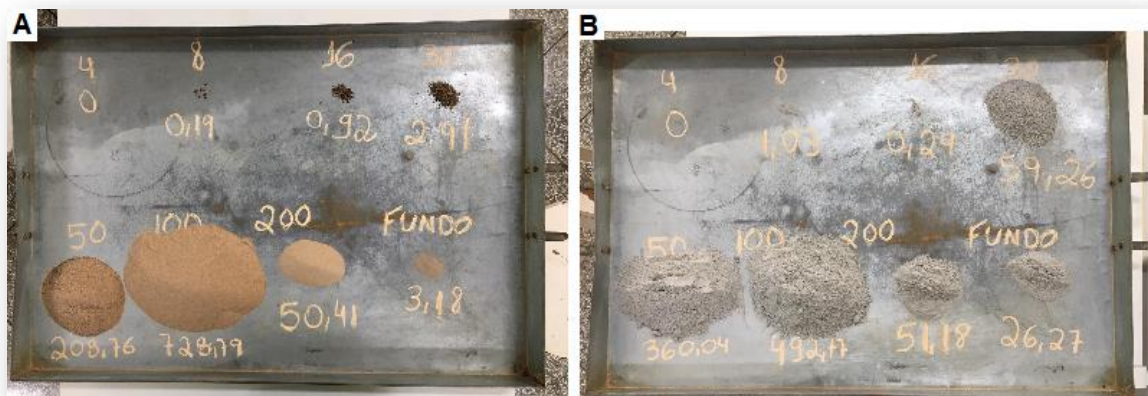
Fonte: próprio autor (2019).

Figura 8 - (A) areia. (B) RPPO.



Fonte: próprio autor (2019).

Figura 9 - (A) Bandejas com a quantidade das massas de areia retidas em cada peneira. (B) Bandejas com a quantidade das massas de RPPO retidas em cada peneira.



Fonte: próprio autor (2019).

Utilizando a equação 1, pode-se encontrar o módulo de finura da areia e do RPPO:

$$MF = \sum \frac{\% \text{ retida acumulada}}{100} \quad (1)$$

Através:

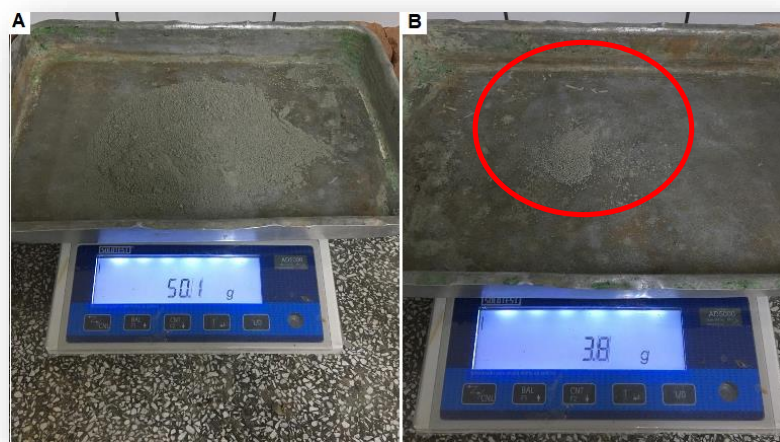
MF: módulo de finura.

Os ensaios de Curvas Granulométricas foram realizados no Laboratório de Construção Civil da Universidade do Oeste Paulista.

Já a curva granulométrica do cimento CPV-ARI foi feita baseada na norma NBR 11579 [38], onde 50g do material pozolânico (cimento) foi colocado na peneira 200, com abertura 0,075 mm, e assim foi feita uma vibração manual durante 20 minutos e então pesou-se a massa retida na peneira como mostra a Figura 10:

Figura 10 - (A) Amostra de cimento CPV-ARI destinada ao ensaio granulométrico. (B)

Massa do cimento após ser passado na peneira 200.



Fonte: próprio autor (2019).

Com a equação 2, pode-se calcular o módulo de finura do cimento:

$$F = \frac{R.C}{M} \times 100 \quad (2)$$

Através:

F: índice de finura do cimento; R: resíduo do cimento na peneira 200 em gramas; C: fator de correção da peneira utilizada no ensaio, adotando 1,0; M: massa inicial do cimento em grama.

- Ensaio de densidade

O ensaio seguiu a NBR NM 52 – 2009 [39], onde foram realizados os ensaios do cimento, areia e RPPO. Os procedimentos foram feitos no Laboratório de Construção Civil da Universidade do Oeste Paulista (UNOESTE).

Os cálculos são feitos seguindo as equações 3,4,5 e 6:

- Massa específica aparente do agregado seco:

$$d_1 = \frac{m}{V-Va} \quad (3)$$

Através:

d_1 : massa específica aparente do agregado seco (g/cm³); m : massa da amostra seca em estufa (g); V : volume do frasco (cm³) e Va : volume da água adicionada ao frasco, seguinte a próxima equação:

$$Va = \frac{m_2 - m_1}{\rho a} \quad (4)$$

Através:

m_1 : massa do conjunto (frasco + agregado); m_2 : massa total (frasco = agregado + água) e ρa : massa específica da água (g/cm³).

- Massa específica do agregado saturado superfície seca:

$$d_2 = \frac{ms}{V-Va} \quad (5)$$

Através:

d_2 : massa específica do agregado saturado superfície seca (g/cm³); ms : massa da amostra na condição saturada superfície seca (g); V : volume do frasco (cm³) e Va : volume de água adicionada ao frasco (cm³).

- Massa específica:

$$d_3 = \frac{m}{(V-Va) - \frac{ms-m}{\rho a}} \quad (6)$$

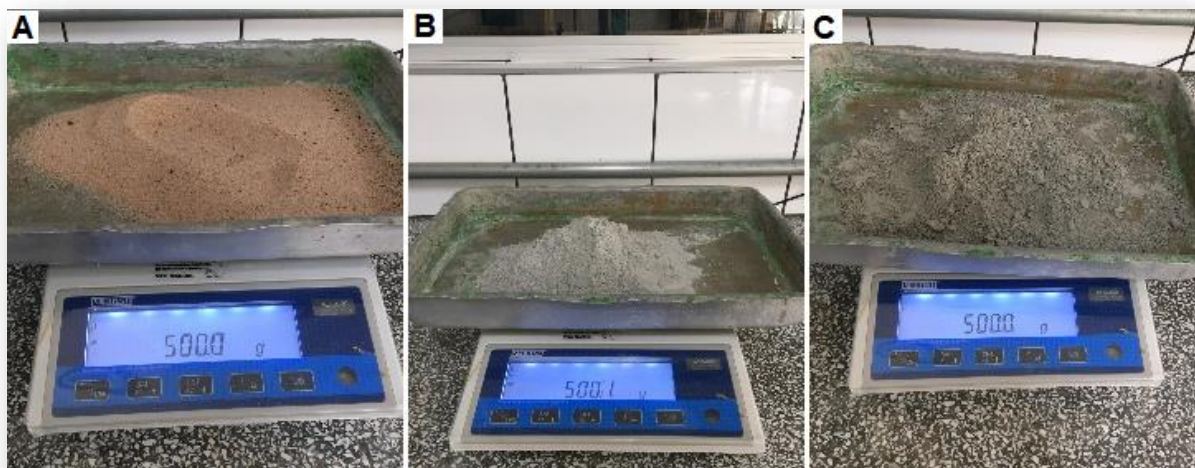
Através:

d_3 : massa específica do agregado (g/cm³); m : massa da amostra seca em estufa (g); V : volume do frasco (cm³); Va : volume de água adicionada ao frasco (cm³); ms : massa da amostra na condição saturada superfície seca (g) e ρa : massa específica da água (g/cm³).

Tomar como valor definitivo a média dos resultados obtidos entre as amostras.

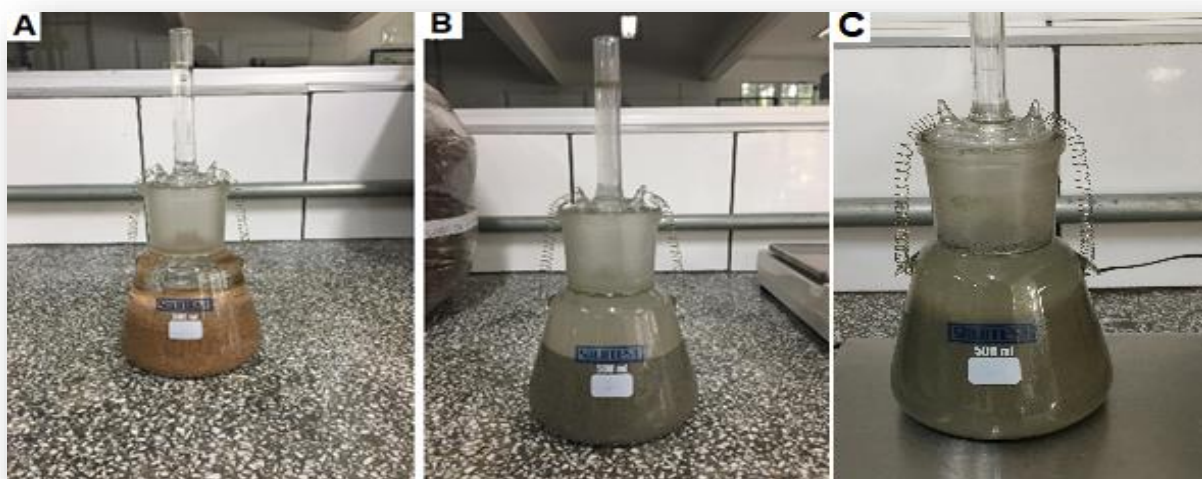
As Figuras 11, 12, 13 e 14 mostram o decorrer desse ensaio de densidade:

Figura 11- (A) Massa da areia para iniciar o ensaio. (B) Massa do RPPO para iniciar o ensaio. (C) Massa do cimento CPV-ARI para iniciar o ensaio.



Fonte: próprio autor (2019).

Figura 12 - (A) 500 gramas de areia no frasco de 500 ml. (B) 500 gramas de RPPO no frasco de 500 ml. (C) 500 gramas de cimento CPV-ARI no frasco de 500 ml (Picnomêtro).



Fonte: próprio autor (2019).

Figura 13 - (A) Massa de areia após o ensaio de densidade, destinada a secagem em estufa. (B) Massa de RPPO após o ensaio de densidade, destinada a secagem em estufa. (C) Massa de cimento após a secagem em estufa por 24 horas.



Fonte: próprio autor (2019).

Figura 14 – (A) Massa da areia após o ensaio e a secagem. (B) Massa do RPPO após o ensaio e a secagem. (C) Massa do cimento CPV-ARI após o ensaio e a secagem.



Fonte: próprio autor (2019).

O ensaio de densidade foi realizado também no Frasco de Chapman, onde seguia a norma NBR 9776, que estava em vigor até 2009. Só que essa norma foi cancelada e indicado seguir à NM 52 também. Mas mesmo cancelada, o ensaio foi feito no Frasco de Chapman também para comparar os resultados.

O ensaio consiste em colocar água dentro do frasco até a marca de 200 cm³ e acrescentar 500 g do agregado miúdo seco, e marcar o volume do conjunto, que nada mais é do que a leitura no frasco. Em seguida substituir os valores encontrados, na equação 7, e determinar a massa específica do agregado [40]:

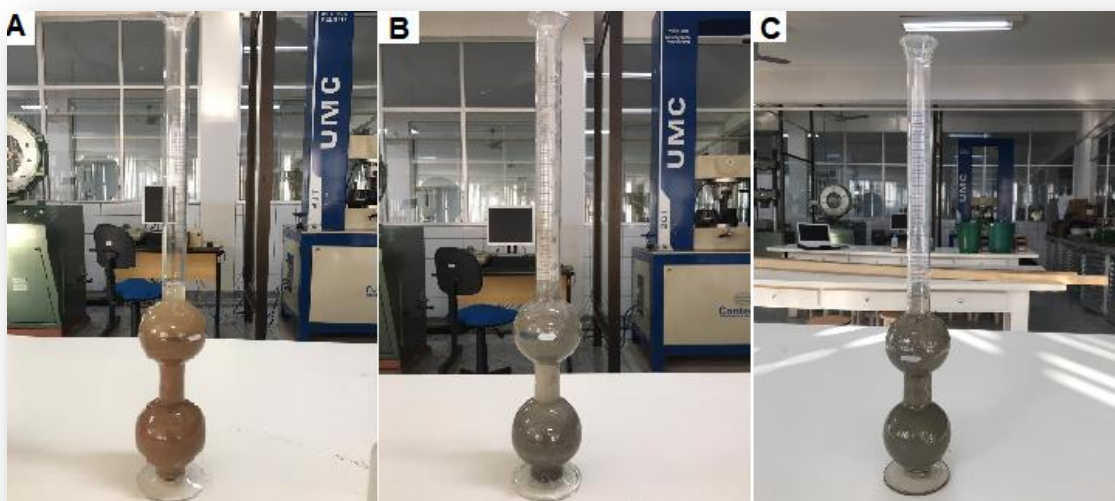
$$\gamma = \frac{500}{L-200} \quad (7)$$

Através:

γ : massa específica do agregado miúdo (g/cm³); L : volume da leitura no frasco (cm³).

A Figura 14 mostra o frasco utilizado nesse ensaio:

Figura 15 - (A) Areia no Frasco de Chapman. (B) RPPO no Frasco de Chapman. (C) Cimento CPV-ARI no Frasco de Chapman.



Fonte: próprio autor (2019).

E para finalizar o ensaio de densidade seguiu também a norma NBR 16605 [41], apenas para o material pulverulento, o cimento, onde foi adicionado água no frasco de Le Chatelier até a marca de 1 cm³, e adicionado 60 g de cimento Portland e anotado o volume mostrado no frasco. A partir disso calculou-se o módulo de finura do cimento através da equação 8:

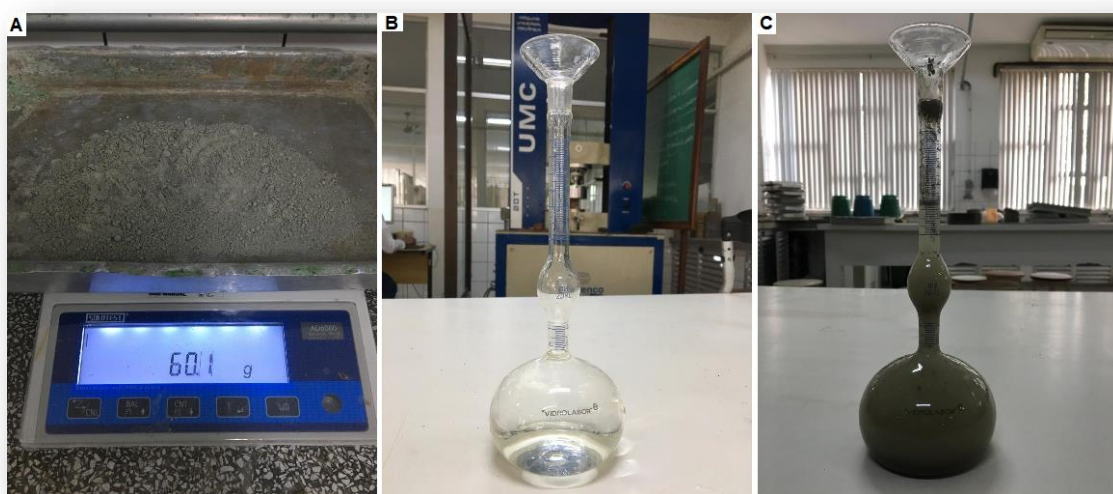
$$\gamma = \frac{m}{V_1 - V_2} \quad (8)$$

Através:

γ : módulo de finura do cimento (g/cm^3); m : massa inicial do cimento (g) ; V_1 : leitura inicial do volume no frasco (cm^3); V_2 : leitura final do volume já com a massa do cimento no frasco (cm^3).

A Figura 16 representa o ensaio acima citado:

Figura 16 - (A) Massa do cimento destinado ao ensaio de densidade. (B) Frasco de Le Chatelier com a quantidade de água exigida para o ensaio. (C) Frasco de Le Chatelier com a água e a massa de cimento.



Fonte: próprio autor (2019).

Microscópico

Os ensaios de microscopia são utilizados para diversas aplicações, como para, analisar a morfologia e estrutura dos materiais, para avaliar presença de poros e defeitos, superfícies de fratura, linhas de solda, cargas orgânicas e inorgânicas, dispersão de pigmentos e reforços fibrosos.

• Ensaio de Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A microscopia eletrônica de varredura é utilizada para o estudo de estruturas superficiais de amostras com as mais variadas dimensões, produzindo imagens de alta resolução e alta ampliação de detalhes sem a perda da nitidez. Com esse ensaio também é possível identificar os elementos químicos presentes nas amostras via EDS (*Energy Dispersive Spectroscopy – Espectroscopia por Dispersão de Energia de raios-X*) [42].

O ensaio do MEV foi realizado no Laboratório especializado da Unesp, sob responsabilidade da laboratorista Glenda, nas amostras de cimento, areia e RPPO, e também nas chapas. As Figuras 17 e 18 indicam os processos desse ensaio:

Figura 17 - Amostras banhadas no ouro sobre fitas de carbono.



Fonte: próprio autor (2019).

Figura 18 - Equipamento de Análise de Microscopia Eletrônica de Varredura.



Fonte: próprio autor (2019).

- Microscopia Óptica

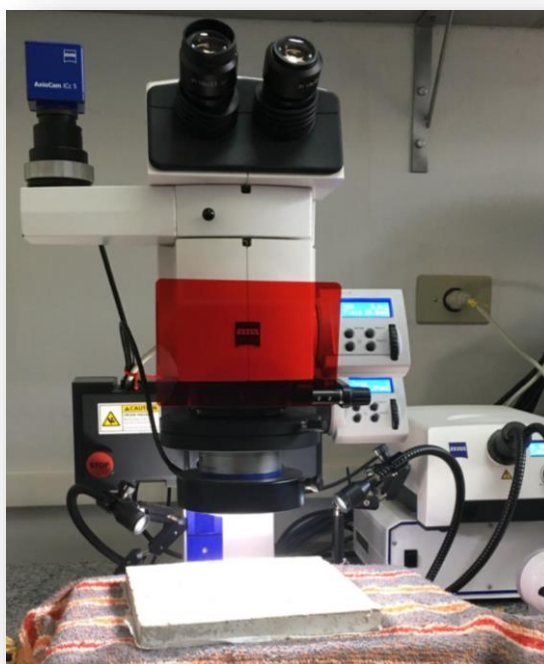
O ensaio de microscopia óptica foi feito em um instrumento óptico, que faz uso da refração da luz oriunda de uma série de lentes, para ampliar e regular estruturas invisíveis ou muito difíceis de serem vistas à olho nu.

A diferença entre a microscopia óptica e a microscopia eletrônica de varredura é que a segunda não utiliza luz visível e pode ser ampliada em escala maior.

A microscopia óptica auxilia na análise da estrutura morfológica dos materiais, podendo avaliar macro e microestruturas, homogeneidade, esferulitos, mudanças de fase, orientação de fibras. O ensaio utilizou um microscópio da marca *Zeiss Stereo Discovery. V12*, acoplado a uma câmera digitalizadora (*ExwareHAD, Sony, modelo SSC-DC54A*).

Esse ensaio foi executado na Unesp, feito no cimento, areia, RPPO e nas chapas, como mostra a Figura 19:

Figura 19 - Microscópio Zeiss Discovery V.12.



Fonte: próprio autor (2019).

4.3.1.2 Traço para as chapas de resíduo-cimento

Nas Tabelas 2 e 3 mostram as composições dos corpos de provas com traço em volume e em massa:

Tabela 2 – Composições dos corpos de provas em teor volumétrico.

Traço	Cimento (%)	RPPO (%)	Areia (%)
1:0:6	10	0	100
1:0,6:5,4	10	10	90
1:0,9:5,1	10	15	85
1:1,2:4,8	10	20	80

Fonte: próprio autor (2019).

Tabela 3 – Composições dos corpos de provas em massa.

Traço	Cimento (kg)	RPPO (kg)	Areia (kg)
1:0:5,64	1	0	5,64
1:0,6:5,07	1	0,6	5,07
1:0,9:4,79	1	0,9	4,79
1:1,2:4,51	1	1,2	4,51

Fonte: próprio autor (2019).

O traço em massa foi calculado por meio da massa unitária de cada agregado, segundo a NBR NM 45 [43]. Seguindo a equação 9 abaixo:

$$\delta_{ap} = \frac{m_{ar}-m_r}{V} \quad (9)$$

Através:

δ_{ap} : massa unitária do agregado (kg/m³); m_{ar} : massa do recipiente mais o agregado (kg); m_r : massa do recipiente vazio (kg); V: volume do recipiente (m³).

Encontrando a massa unitária de cada agregado e do aglomerante, prosseguiu-se utilizando a equação 10, para obter o traço em massa:

$$M = VxJ \quad (10)$$

Através:

M: massa do agregado (kg); V: traço do agregado em teor volumétrico (dm³); J: massa unitária de cada agregado (kg/dm³).

A massa unitária de cada agregado e do aglomerante está exposta na Tabela 4:

Tabela 4 – Massa unitária dos agregados e aglomerante.

Massa Unitária (massa/volume)			
Cimento	1,0586 g/cm ³	1058,6 kg/m ³	1,0586 kg/dm ³
RPPO	1,0594 g/cm ³	1059,4 kg/m ³	1,0594 kg/dm ³
Areia	0,9942 g/cm ³	994,2 kg/m ³	0,9942 kg/dm ³

Fonte: próprio autor (2019).

O índice de vazios dos agregados e do aglomerante também foram cálculos seguindo a equação 11:

$$Ev = \frac{100 \times [(d_1 \times \delta_w) - \delta_{ap}]}{(d_1 \times \delta_w)} \quad (11)$$

Através:

Ev: índice de vazios (%); d_1 : massa específica relativa do agregado seco; δ_w : massa específica da água; δ_{ap} : massa unitária média do agregado. Utilizar a mesma unidade de medida para todos.

Na Tabela 5 estão indicados os valores dos índices de vazios:

Tabela 5 – Índice de Vazio dos agregados e aglomerante.

Índice de Vazios	
Cimento	0,66
RPPO	0,62
Areia	0,61

Fonte: próprio autor (2019).

O índice de vazio foi calculado em uma massa de 500 g de cada amostra. O resíduo, RPPO, foi a amostra que apresentou uma quantidade média de vazios nesse mesmo volume de 100%, com 0,62. Assumindo uma denominação “média” de índice de vazios e porosidade quando comparado com o agregado, areia e o aglomerante, cimento. Esse índice de vazios pode estar relacionado com a sua granulometria, onde a densidade de empacotamento foi maior.

A Tabela 6 mostra as relações numéricas dos agregados e aglomerante com a água:

Tabela 6 – Fator água cimento.

Fator: (%)	0%	10%	15%	20%
A/C (água/cimento)	1,3	1,3	1,3	1,3

Fonte: próprio autor (2019).

A argamassa obteve a fração ativa (aglomerante), o cimento, e a fração inerte (agregado), a areia e o resíduo.

Em um material cimentício, a água pode assumir duas posições, sendo água de camada de superfície, onde forma um filme d'água sobre a superfície das partículas, influenciando diretamente na fluidez da mistura e está relacionada com a área específica do sistema, ou então, ser água de preenchimento dos vazios entre as partículas, onde a mesma está relacionada com a densidade de empacotamento do sistema [44].

Por serem compósitos constituídos de partículas com granulometria fina e uma baixa relação água/cimento, essas argamassa apresentam matrizes mais densas obtidas a partir da otimização do empacotamento dos materiais granulares, enquanto a trabalhabilidade adequada é obtida com a dispersão das partículas promovida pela incorporação do resíduo.

Esse traço foi escolhido com o intuito de utilizar maior quantidade de areia em relação ao cimento, e assim podendo substituir porcentagens maiores da mesma pelo resíduo (RPPO), 10, 15 e 20%, para poder analisar com mais facilidade os efeitos desse resíduo em comparado com a matriz cimentícia.

4.3.2 Etapa de confecção das chapas

As chapas foram fabricadas de acordo com a NBR 5738 - 2016 [45]:

A Tabela 7 mostrará a cronologia de fabricação das chapas:

Tabela 7 – Cronologia da produção e cura dos corpos de provas.

Tempo:	Piloto (0% de RPPO)	10% de RPPO	15% RPPO	20% RPPO
1º semana	Fabricação e imersão	-	-	-
2º semana	Desforma e imersão	Fabricação e imersão	-	-
3º semana	Imersão	Desforma e imersão	Fabricação e imersão	-
4º semana	Imersão	Imersão	Desforma e imersão	Fabricação e imersão
5º semana	Ensaio (28 dias)	Imersão	Imersão	Desforma e imersão
6º semana	-	Ensaio (28 dias)	Imersão	Imersão
7º semana	-	-	Ensaio (28 dias)	Imersão
8º semana	-	-	-	Ensaio (28 dias)

Fonte: próprio autor (2019).

- Mistura

Foram feitas misturas de cimento, areia, RPPO e água em suas devidas proporções. A mistura de cada massa levou em cerca de 2 minutos. A quantidade de água foi determinada pelo ensaio de consistência de argamassa, seguindo a NBR 13276 [46], mantendo a média dos 2 diâmetros da abertura da massa em 23 cm aproximadamente.

- Moldagem

As chapas foram moldadas em formas metálicas de 19x19x2 cm, recebendo o apoio na base e na superfície por placas de madeiras finas. A colocação das argamassas nas formas recebeu o auxílio de pá de pedreiro e as massa sofreram leves vibrações para o espalhamento uniforme.

- Cura

O processo de cura foi úmido e consistiu na imersão dos corpos de provas por 28 dias para assim os ensaios serem executados.

As Figuras 20 à 24 mostram os processos de preparo, moldagem e cura das argamassas:

Figura 20 - (A) Mistura dos compósitos e acréscimo de água. (B) Quantidade de água totalmente adicionada. (C) Massa pronta para as moldagens.

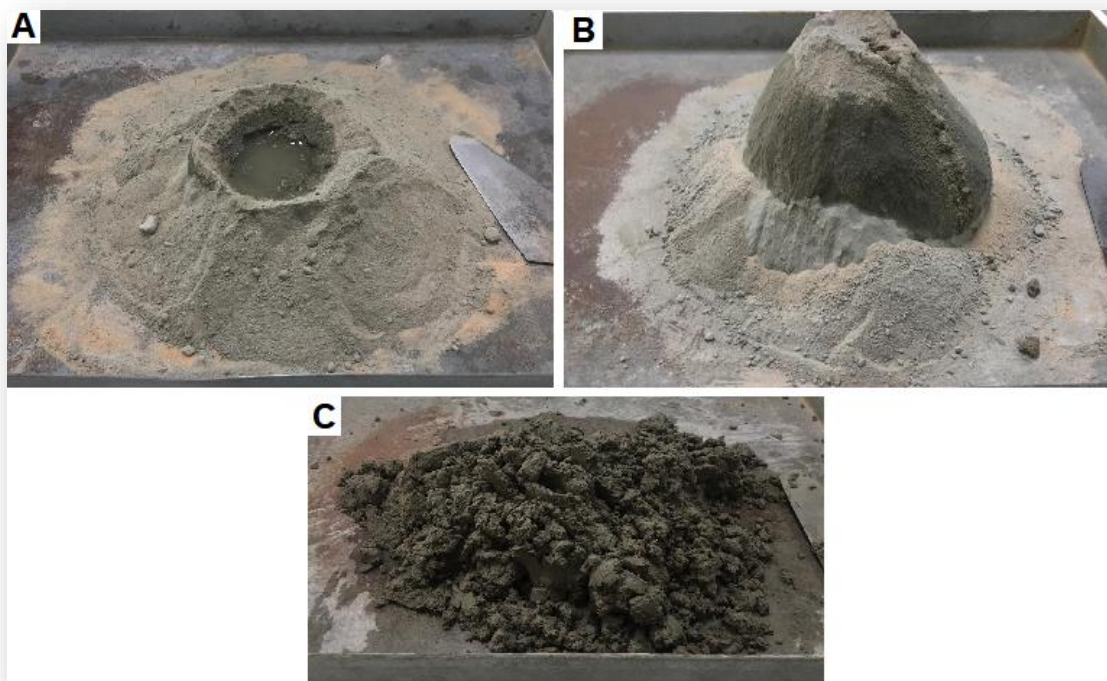
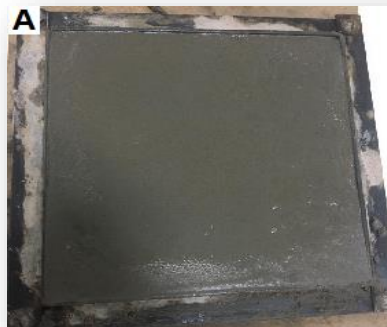


Figura 21: (A) Massa dentro do cone. (B) Cone retirado. (C) Massa após os 30 golpes no ensaio de consistência para argamassa.



Fonte: próprio autor (2019).

Figura 22: Chapa Cimentícia na forma.



Fonte: próprio autor (2019).

Figura 23: Chapa Cimentícia desenformada após 7 dias.



Fonte: próprio autor (2019).

Figura 24: Chapa Cimentícia após 28 dias imersas em água.



Fonte: próprio autor (2019).

4.3.3 Etapa de aceitação do produto (caracterização)

Foram realizados os ensaios nas chapas, os resultados foram elaborados e discutidos, e assim, dando conclusão à pesquisa.

4.3.3.1 Ensaios das chapas

Física

Nos ensaios físicos, pode fazer o controle de qualidade e especificações dos materiais, avaliando propriedade que afetam diretamente tanto o processamento quanto a aplicação final da peça ou produto.

• Ensaio de Absorção de água

O ensaio de absorção de água foi realizado baseando-se no método de água fria, normatizado pela NBR 9778 [47], caracterizando-se a partir da imersão da amostra em água fria.

O ensaio avalia o aumento do volume da massa das chapas, quando submetidas em água havendo imersão por 72 horas, representando, assim, a quantidade de água absorvida, indiretamente a porosidade do material ensaiado. Os procedimentos foram realizados na Unesp – Campus de Presidente Prudente.

A absorção é determinada pela equação 12 abaixo:

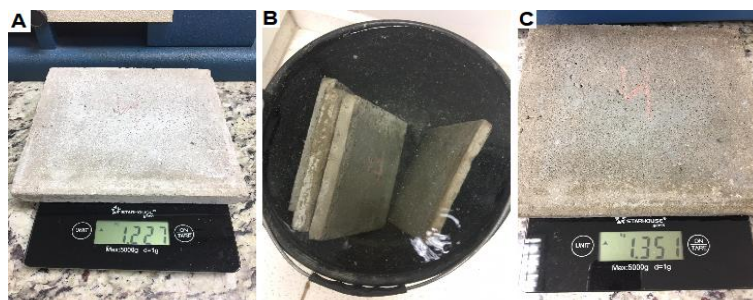
$$AA (\%) = \frac{Mu - Ms}{Ms} \times 100 \quad (12)$$

Através:

AA: absorção de água (%); Mu: massa do corpo de prova úmido (g) → depois da fervura ou da hidratação; Ms: massa do corpo de prova seco (g).

A Figura 25 abaixo mostra o procedimento realizado no ensaio de absorção, onde as chapas foram secas e posteriormente imersas em água:

Figura 25 – (A) Chapa Cimentícia seca em estufa. (B) Chapas Cimentícias imersas em água. (C) Chapa Cimentícia após a imersão.

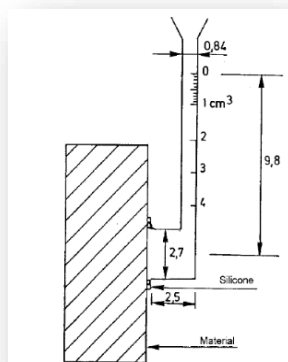


Fonte: próprio autor (2019).

- Permeabilidade

O ensaio de permeabilidade seguiu a ASTM E514 [48], onde um cachimbo de plásticos (Tubo de Carsten) é fixado na chapa e preenchido com 5 mililitro de água. Por meio do tempo e da quantidade de água que foi diminuída no cachimbo, tem-se a permeabilidade da chapa cimentícia. Podendo avaliar se o corpo de prova é de boa permeabilidade ou não, através dos aparecimentos de manchas de água na interface do mesmo. O ensaio foi feito no laboratório de Construção Civil da Universidade do Oeste Paulista. A Figura 26 mostra de forma esquemática como o ensaio de permeabilidade deve ser feito, já a Figura 27 representa o ensaio de permeabilidade sendo feito em uma das chapas:

Figura 26 – Desenho esquemático do ensaio de permeabilidade.



Fonte: <https://www.passeidireto.com/arquivo/36559427/ensaio-de-absorcao-cachimbo> (2002).

Figura 27 – Cachimbo com água e fixado na chapa cimentícia.



Fonte: próprio autor (2019).

- Massa Específica

As massas específicas das chapas cimentícias foram calculadas seguindo a NBR 9778 [47], sendo determinadas as massas secas, úmidas e imersas das chapas, utilizando as equações 13 e 14 abaixo:

$$\text{Massa específica da amostra seca} = \frac{M_s}{M_{sat} - m_i} \quad (13)$$

Através:

M_s : massa seca da chapa (g); M_{sat} : massa saturada da chapa (g); m_i : massa da chapa imersa (g).

$$\text{Massa específica da amostra saturada} = \frac{M_{sat}}{M_{sat} - m_i} \quad (14)$$

Através:

M_{sat} : massa saturada da chapa (g); m_i : massa da chapa imersa (g).

A Figura 28 mostra a pesagem das chapas cimentícias sendo feita para obter a massa imersa:

Figura 28 – Pesagem da chapa cimentícia imersa em água.



Fonte: próprio autor (2019).

A pesagem das chapas imersas em água foi realizada no Laboratório de Construção Civil da Unoeste.

- Índice de Vazios (Porosidade)

Os cálculos dos índices de vazios das chapas cimentícias seguiram à NBR 9778 [47], utilizando a equação 15 abaixo:

$$Iv = \frac{Msat - Ms}{Msat - mi} \quad (15)$$

Através:

Iv: índice de vazios; Msat: massa saturada (g); Ms: massa seca (g); mi: massa imersa (g).

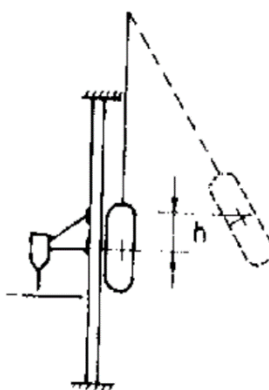
Mecânico

• Ensaio de impacto

O ensaio de impacto foi baseado na ABNT 15575-4 [49], onde foi realizado o ensaio de impacto à corpo duro, com o intuito de avaliar as energias de impactos (choques gerados durante o uso da edificação) que os corpos de provas suportam sem apresentar trincas, fissuras ou ruínas, e por fim podendo indicar a utilização das chapas, para ambiente interno ou externo, com ou sem função estrutural. O procedimento destrutivo foi executado no Laboratório de construção Civil da Unoeste. O ensaio de impacto foi o escolhido entre as análises mecânicas existentes, pois é o mais crítico, e proporcionará resultados maiores e assim, diminuindo a valia de realizar os outros ensaios.

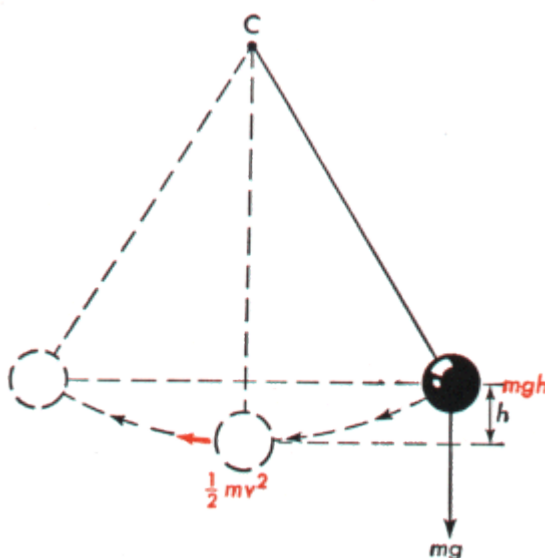
As Figuras 29 e 30 mostram de forma esquematizada como o ensaio foi realizado:

Figura 29 – Esquema demonstrativo do ensaio de Impacto.



Fonte: Avaliação de desempenho estrutural de protótipo com paredes construídas com blocos EVA (2009).

Figura 30 – Demonstração das posições adequadas dos componentes do ensaio.



Fonte: <http://www.fisica.ufpb.br/~mkyotoku/respostas/respostas6.htm>.

A esfera utilizada no ensaio foi de chumbo e massa de 0,5 kg. Foram dados 10 impactos às alturas de 0,5 e 0,75 metros em cada chapa cimentícia, onde as energias geradas de impacto foram 2,5 e 3,75 Joules respectivamente.

Térmico

Os ensaios térmicos são feitos com o intuito de analisar o comportamento térmico de determinado material, e assim adquirir conhecimentos sobre parâmetros e condições de processamento, composição, estabilidade térmica, temperatura de uso e outros fatores.

O desperdício de energia vem cada vez mais sendo uma preocupação para o setor industrial, onde o conceito de energia adquiriu um novo sentido, visando a economia à fim de reduzir as perdas ou transferências energéticas de forma mais eficiente [50].

Joule em 1847, mostrou que calor também é uma forma de energia, na 1ª Lei da Termodinâmica. Isso significa que um sistema perde calor ao ambiente à sua volta e ao mesmo tempo está perdendo energia. Com isso a finalidade do isolamento térmico é reduzir ao máximo as trocas térmicas indesejadas utilizando materiais isolantes térmicos.

O calor é transferido do ambiente mais quente para o mais frio naturalmente. De forma geral os materiais porosos são melhores isolantes térmicos, ou seja, conduzem menos o calor, por apresentarem o ar contido nos espaços vazios [51].

• Condutividade Térmica / Resistência Térmica

O ensaio térmico realizou-se da seguinte forma: O corpo de prova foi colocado dentro de uma caixa de isopor, no centro, onde uma fonte de calor (luz) foi acesa, passando-se a onda térmica ao longo da caixa, por 10 sensores térmicos, que foram lidos por meio de um programa de computador, chamado Arduino software free, podendo-se, assim ter a média das temperaturas dos dois lados da chapas, obtendo-se a quantidade de calor que a mesma absorverá. O ensaio foi realizado em temperatura externa ambiente controlada de 24 graus [52]. O procedimento foi realizado em um laboratório do Campus da Unesp em Presidente Prudente.

As equações 16 e 17 abaixo foram utilizadas para calcular a condutividade térmica e a resistência térmica por meio da lei de Fourier:

$$R = \frac{\Delta T}{\frac{q}{A}} \quad (16)$$

Através:

R: resistência térmica ($\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{w}$); ΔT : variação de temperatura (K); q: fluxo de calor (w/m^2) e A: área (m^2).

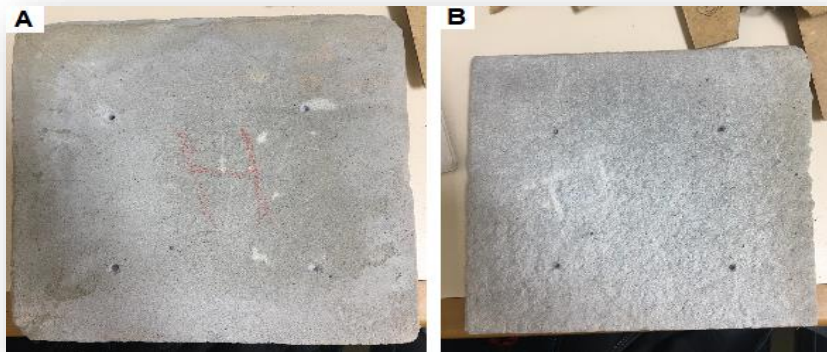
$$\lambda = \frac{e}{R} \quad (17)$$

Através:

λ : condutividade térmica ($\text{w}/\text{m}\cdot\text{K}$); e: espessura (m) e R: resistência térmica ($\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{w}$).

As Figura 31 à 35 relatam o decorrer do ensaio térmico das chapas cimentícias:

Figura 31 - (A) Chapa lado 1, com os orifícios nos 4 quadrantes. (B) Chapa lado 2, com os orifícios nos 4 quadrantes.



Fonte: próprio autor (2019).

Figura 32- Caixa térmica de isopor revestida de madeira mdp.



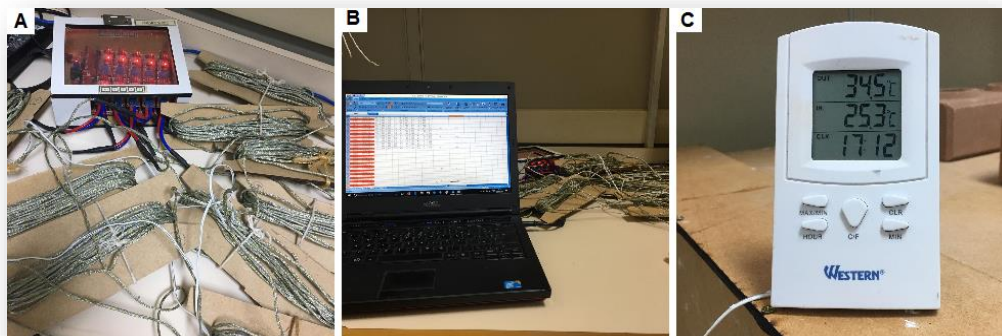
Fonte: próprio autor (2019).

Figura 33 - Placa com os termopares fixos.



Fonte: próprio autor (2019).

Figura 34 - (A) Caixa distribuidora dos termopares. (B) Notebook com o software térmico. (C) Termômetro com temperatura externa e interna da caixa térmica.



Fonte: próprio autor (2019).

Figura 35 - Caixa térmica completa.



Fonte: próprio autor (2019).

Acústico

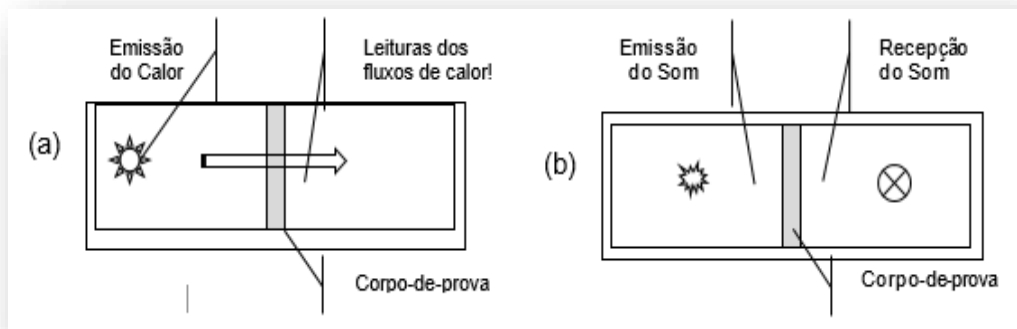
A avaliação do desempenho acústico de edificações habitacionais visa proporcionar condições de conforto acústico no interior dos seus ambientes ou reduzir os impactos causados no seu entorno.

Cada vez mais há a necessidade de bloquear os ruídos externos nas edificações, mesmo que de forma parcial, proporcionando um melhor conforto acústico aos usuários. O isolamento acústico acontece quando consegue-se reduzir significativa passagem de som de um ambiente para o outro. Diversos materiais tem a capacidade de ajudar nesse isolamento.

• Ensaio de Atenuação sonora

Para a análise da atenuação acústica, foi utilizado o mesmo aparato do ensaio térmico, em que os CPs foram submetidos ao ensaio denominado “Câmara Acústica”, posicionando-se as placas com o separador de duas câmaras distintas e isoladas, de modo que, na primeira, houve a geração do som e, na segunda, sua medição, quantificando-se o isolamento acústico do material [53]. O som emitido foi produzido pelo aplicativo “*Function Generation*” e recebido por “*Decibel X Pro*”. O ensaio consistiu em 3 frequências diferentes, 250, 1000 e 4000 Hz. A Figura 36 representa os aparatos dos ensaio térmico e acústico, já a Figura 37 mostra o ensaio acústico sendo realizado em uma das chapas:

Figura 36 - (a) Ensaio Térmico; (b) Ensaio Acústico.



Fonte: próprio autor (2019).

Figura 37 – Vedação da placa com vaselina.



Fonte: próprio autor (2019).

O Ensaio Acústico foi realizado no laboratório da Maquetaria no Campus da Unesp de Presidente Prudente.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios experimentais desenvolvidos para este trabalho. Primeiramente estão apresentados os resultados e discussões das caracterizações dos materiais utilizados, logo em seguida estão os ensaios tecnológicos das chapas.

- **Fluorescência de raios-X**

A Tabela 8 apresenta os resultados obtidos pelo ensaio de fluorescência de raios-X nas amostras de RPPO, areia e cimento.

Tabela 8 – Composição em massa (%) das amostras de RPPO, areia e cimento.

Constituintes (%):	RPPO	AREIA	CIMENTO
Análise Qualitativa			
SiO ₂	64,807	95,988	21,516
Al ₂ O ₃	17,326	1,730	-
CaO	6,110	0,091	65,926
Fe ₂ O ₃	5,308	0,515	3,964
K ₂ O	4,597	0,518	1,485
TiO ₂	1,139	0,704	0,376
SO ₃	0,277	0,337	5,571
ZrO ₂	0,093	0,064	0,016
MnO	0,083	0,016	0,931
SrO	0,069	-	0,088
V ₂ O ₅	0,068	-	0,052
CuO	0,050	0,012	0,026
PdO	0,024	-	-
ZnO	0,021	0,006	0,040
Rb ₂ O	0,019	-	0,009
Y ₂ O ₃	0,005	-	-
NbO	0,003	-	-
Cr ₂ O ₃	-	0,019	-

Fonte: próprio autor (2019).

Na amostra de RPPO foram detectados em maior predominância o dióxido de silício e o óxido de alumínio, e em menores quantidades o óxido de cálcio, óxido de ferro, óxido de potássio e o dióxido de titânio, em ordem decrescente, respectivamente.

Os altos teores de dióxido de silício e óxido de alumínio são típicos de rochas ígneas graníticas [54]. Tudo indica que o óxido de cálcio e óxido de ferro estão associados à composição química do granito, ou dos constituintes lubrificantes e abrasivos utilizados no processo de corte e serragem do granito.

O pó de sílica, ou a presença de dióxido de silício no RPPO, garante um comportamento tixotrópico na argamassa, proporcionando uma melhor fluidez da massa, ou seja, a pasta entra

em movimento com maior facilidade e menos perda de energia. Assim, a argamassa juntamente com o RPPO apresenta uma boa trabalhabilidade na menor presença de água. Podendo então, dizer que o efeito tixotrópico é a energia necessária para a pasta entrar em movimento. Já a característica de maior coesão e fluidez da pasta com o RPPO, pode ser explicada levando em conta os tamanhos dos grãos específicos do pó de mármore, que podem ser chamados de *fillers*, por serem muito pequenos [55].

Através do ensaio de fluorescência de raios-X, obteve-se a composição química do resíduo, como citado acima, e assim, podendo notar uma grande semelhança de resultados com outros estudos feitos em pesquisas diferentes utilizando o mesmo resíduo, onde a alta presença de dióxido de silício se faz predominante em todos os resíduo de processamento de pedras ornamentais [56-61].

Devido à grande presença de sílica (quartzo) no RPPO, o risco de doenças respiratórias para a população que inalar esse pó, é grande, podendo destacar a Silicose [56, 62].

A presença significativa de óxido de cálcio no resíduo, pode-se deixar evidente que o seu descarte inadequado na natureza gera problemas ambientais, como a porosidade e aumento da alcalinidade do solo, além da infertilidade [63].

O ensaio de fluorescência da areia indicou como composição principal o dióxido de silício, muito comum em areais naturais de rio.

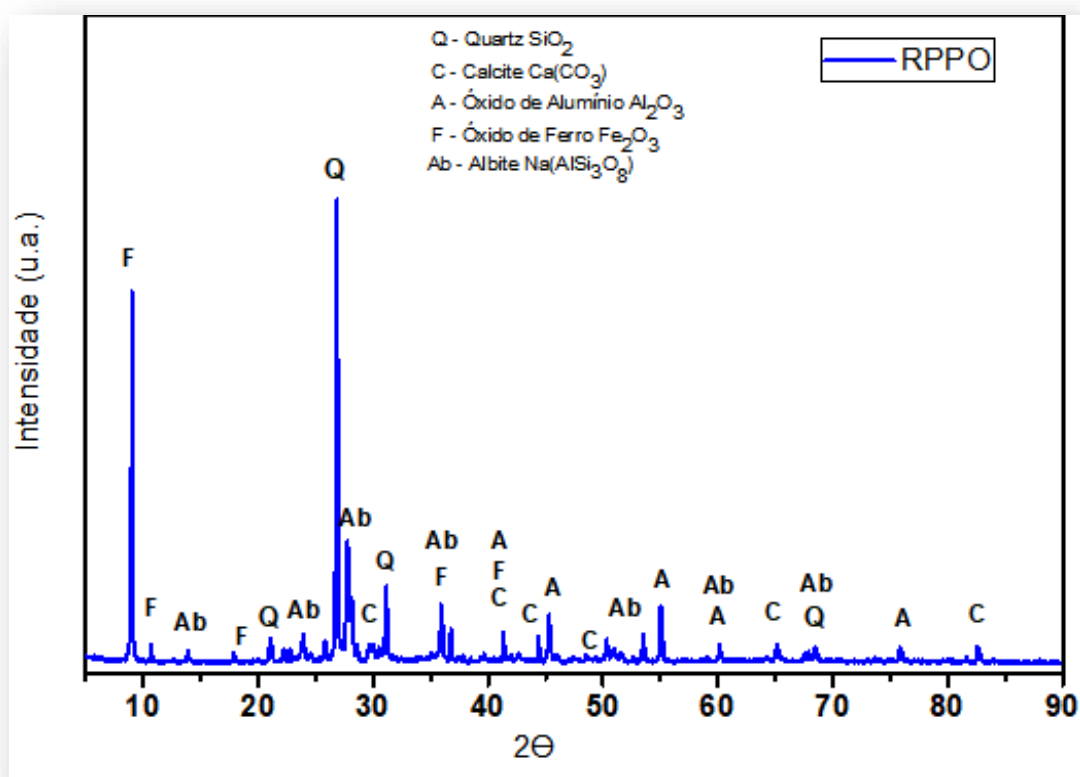
Já a análise do cimento CPV-ARI, mostrou uma maior predominância de óxido de cálcio, em segunda posição assumiu o dióxido de silício, seguido em ordem decrescente de óxido de ferro, óxido de enxofre e, por fim, o óxido de potássio, não sendo constatada a existência de óxido de alumínio apenas, quando comparado com a composição do RPPO. O alumínio garante parcialmente o processo de oxidação e aparece mais em amostras originadas de minérios.

- **Difração de raios-X**

O ensaio de difração de raios-X (DRX) é capaz de identificar somente as fases superiores à 3% de cada substâncias, e não é responsável pela quantificação dessa percentagem apurada, deixando essa função para o ensaio chamado “RIETVELD”. O DRX foi realizado nessa pesquisa com o intuito de complementar os resultados obtidos do ensaio acima, o FRX.

A Figura 38 relata as fases químicas encontradas na amostra de RPPO, junto com a intensidade.

Figura 38 – Difração de raios-X do RPPO.



Fonte: próprio autor (2019).

De acordo com as Ficha JCPDS 1-649, 10-393 e 26-911, os raios-X, quando inseridos no RPPO, detectaram a presença de quartzo (dióxido de silício), calcite, óxido de alumínio, óxido de ferro, podendo notar a mesma composição química relatada no ensaio anterior, fluorescência de raio-X (FRX).

A fase do sódio ou albite aparente nesse ensaio, não foi detectado no FRX, esse ocorrido se deve por ser o primeiro elemento analisado na fluorescência, e com isso deixando a sua presença mais difícil de ser constatada, mas pode-se levar em conta que esse elemento químico seria facilmente aparente no vácuo.

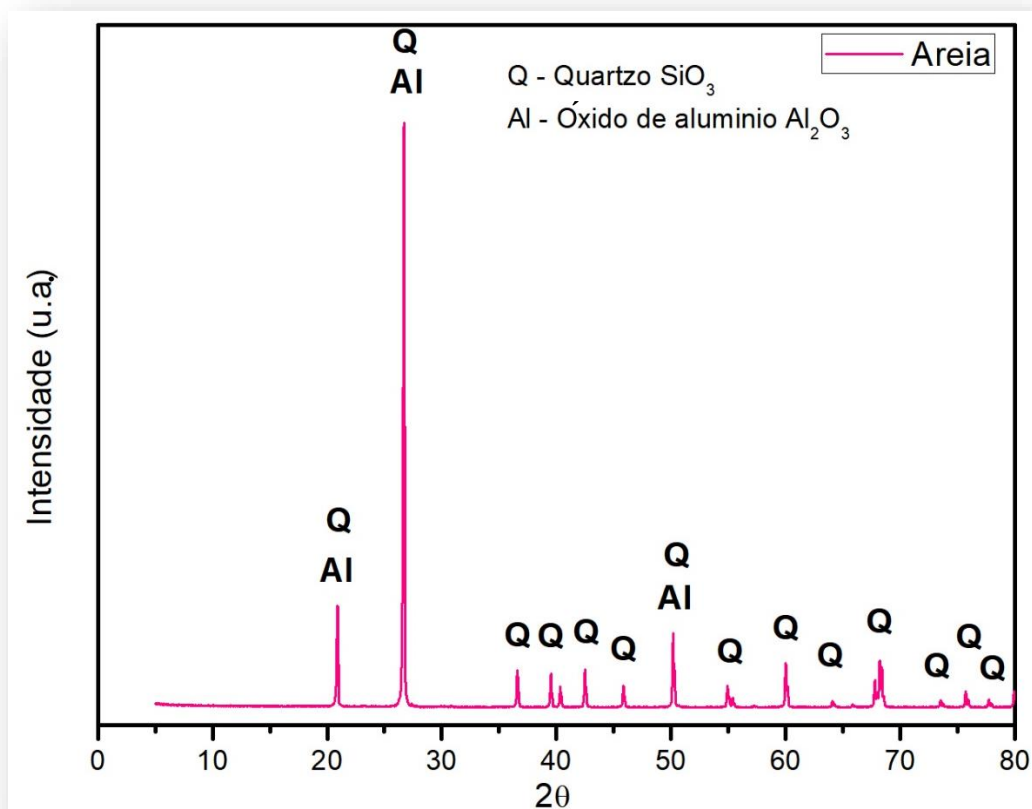
O DRX tem a função de detectar apenas as fases mais presentes do ensaio de FRX. Então, se a quantidade da substância no FRX for pequena, mas a intensidade do pico for grande, é possível constatarla no DRX [56].

Na análise do RPPO foram encontrados 5 fases, sendo o quartzo a mais intensa, não significando ser a maior, lembrando que no DRX não se quantifica.

O FRX do resíduo relatou a presença de substâncias cristalinas, quartzo e moscovita. O resíduo por não apresentar atividade pozolânica, ele atua como agente de nucleação no interior da microestrutura, podendo melhorar a dureza e fragilidade da massa que está sendo inserido. O resíduo de granito, em específico, costuma apresentar os minerais de quartzo, micro cline, moscovita e anorthite, já o resíduo que contém predominância de mármore, apresenta a calcita e dolomita [56]. O DRX do RPPO mostrou a presença de quartzo e calcita especialmente, assim, tudo indicando que o resíduo coletado em Presidente Prudente, estado de São Paulo, tem uma maior predominância desses dois minerais citados anteriormente, o granito e o mármore.

A Figura 39 mostra um difratograma com os resultados de difração da areia natural de rio:

Figura 39 – Difração de raios-X da areia natural.



Fonte: próprio autor (2019).

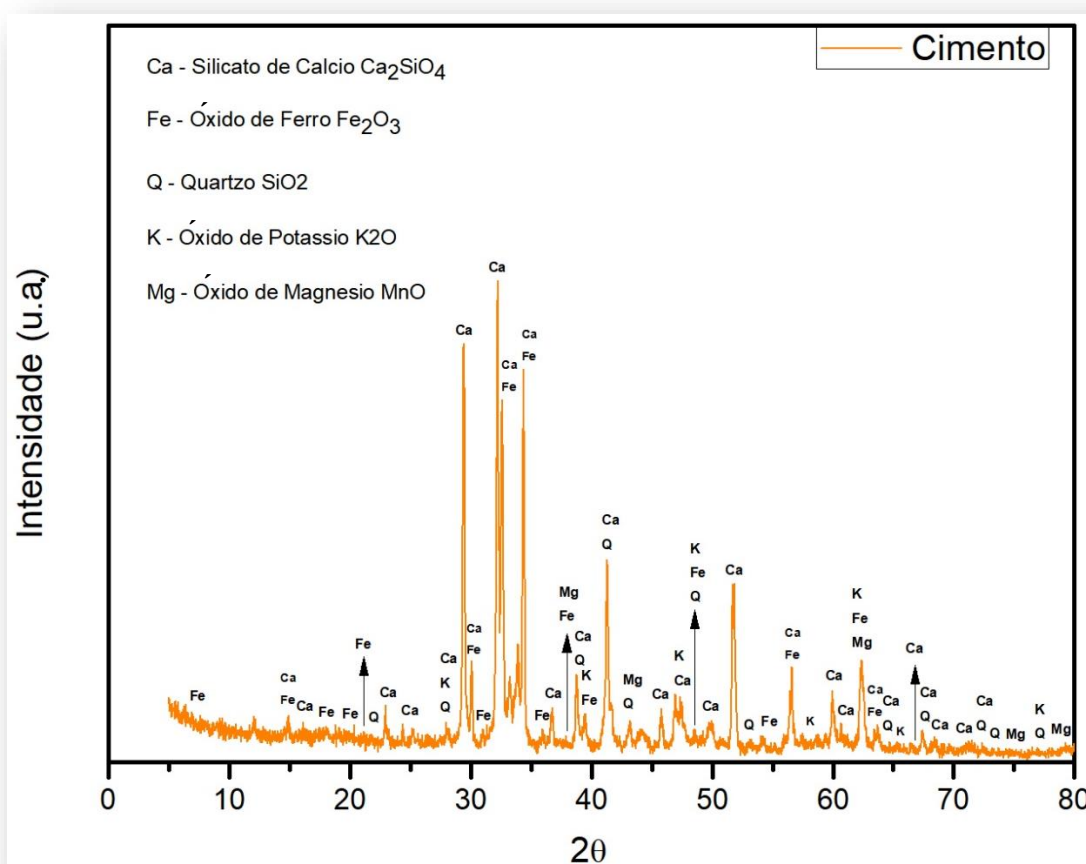
De acordo com a Ficha JCPDS 46-1045, o ensaio de DRX da areia constatou a presença majoritária do quartzo, muito típico do mineral e forma cristalina da sílica. A origem do óxido de silício (quartzo) de rochas ígneas, metamórficas e sedimentares, podem proporcionar uma melhor resistência às chapas fabricadas com essa areia. Além do quartzo pode-se observar,

também, uma pequena parcela de óxido de alumínio, vantajoso para evitar oxidações mais profundas do material que está sendo fabricado.

O ensaio de fluorescência de raios-X relatou substâncias químicas na areia analisada que não apareceram na difração, supostamente são amorfas, ficando dispersas e não formando uma identidade própria, além de não apresentarem uma estrutura atômica definida. Assim, as substâncias detectadas são cristalinas e não amorfas [64].

A Figura 40 aborda as fases do cimento CPV-ARI no ensaio de difração:

Figura 40 - Difração de raios-X da areia natural.



Fonte: próprio autor (2019).

De acordo com as Fichas JCPDS 40-1139, 49-442, 79-1913, 75-1525, 47-1701, o ensaio de DRX do cimento CPV-ARI, constatou a predominância de silicato de cálcio (óxido de cálcio mais complexo), entretanto encontra-se alguns outros picos menores, como o óxido de silício, estando junto com o silicato de cálcio; o óxido de ferro, apresentando alguns picos coincidentes com o silicato de cálcio; o óxido de potássio, embora não encontrado em grandes quantidades, coincide em alguns momentos com os picos de silicato de cálcio; e, por último, o óxido de

magnésio, que por apresentar uma intensidade de pico grande na amostra padrão, se destacou no cimento com picos pequenos. O óxido de enxofre aparente no FRX não foi detectado no DRX.

Devido a reação entre óxido de cálcio e óxido de silício, o cimento apresentou uma grande presença de silicato de cálcio. Além das grandes intensidades do quartzo e calcite, sendo o cálcio o seu principal elemento formador.

Os principais minerais detectados no cimento, também foram encontrados no RPPO, assim, de acordo com AEM Abd Elmoaty, a substituição do cimento pelo RPPO não gera diferença na estrutura química, podendo ser melhor analisada essa hipótese com o ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). O autor ainda cita a ideia de que é mais vantajoso utilizar o RPPO em substituição da areia do que do cimento, pelo motivo evidente do RPPO ajudar nas atividades do cimento, potencializando os seus efeitos, além de apresentar em grande escala a mesma composição da areia, o quartzo [57].

A composição química do RPPO detectada no ensaio de difração de raios-X dessa pesquisa, evidenciou uma grande semelhança à resultados obtidos em outros estudos, podendo tornar mais seguro os dados adquiridos [59, 61].

- **Curva Granulométrica**

Os resultados granulométricos obtidos a partir do ensaio de peneiramento das amostras, estão apresentados nas Tabelas 9 à 11.

Tabela 9 – Granulometria do RPPO.

AGREGADO RECICLADO - RPPO			
Peneira	Abertura (mm)	Massa Retida (g)	% Retida Acumulada
4	4,76	0,0	0,0
8	2,38	1,0	0,1
16	1,19	0,3	0,1
30	0,59	59,3	6,1
50	0,29	360,0	42,5
100	0,149	492,8	92,2
200	0,0074	51,2	97,3
FUNDO	0	26,3	100,0
Conforme NBR NM 248 : 2003			

Fonte: próprio autor (2019).

Tabela 10 – Granulometria da areia.

AGREGADO NATURAL - AREIA			
Peneira	Abertura (mm)	Massa Retida (g)	% Retida Acumulada
4	4,76	0,0	0,0
8	2,38	0,2	0,0
16	1,19	0,9	0,1
30	0,59	2,9	0,4
50	0,29	208,8	21,4
100	0,149	728,8	94,6
200	0,0074	50,4	99,7
FUNDO	0	3,2	100,0
Conforme NBR NM 248 : 2003			

Fonte: próprio autor (2019).

Tabela 11 – Granulometria do cimento CPV-ARI.

AGREGADO INDUSTRIAL - CIMENTO CPV-ARI			
Peneira	Abertura (mm)	Massa Retida (g)	% Retida Acumulada
4	4,76	0,0	0,0
8	2,38	0,0	0,0
16	1,19	0,0	0,0
30	0,59	0,0	0,0
50	0,29	0,0	0,0
100	0,149	0,0	0,0
200	0,0074	76,0	0,1
FUNDO	0	924,0	0,9
Conforme NBR 11579 : 2012 - 2013			

Fonte: próprio autor (2019).

A curva granulométrica de uma argamassa visa garantir em seu estado endurecido, uma redução do volume de vazios e capacidade de deformação. A curva da argamassa apresenta uma fração ativa, sendo os aglomerantes (cimento), e uma outra fração inerte, os agregados (areia e RPPO).

A distribuição granulométrica interfere de forma direta na compacidade da massa, através dos tamanhos e formatos dos grãos. E quanto maior for essa compacidade, maior será a resistência mecânica. A classificação da argamassa é baseada no valor da porcentagem retida entre as peneiras. Quanto mais próximo o valor da porcentagem retida for de 1, maior será a compacidade e continuidade no perfil da curva granulométrica e com isso chega ao relato que:

> Continuidade < trabalhabilidade, devido ao enrijecimento da mistura [65].

As Tabelas 12 à 15 mostram os resultados granulométricos dos agregados nas proporções corretas para cada argamassa feita:

Tabela 12 – Granulometria da argamassa piloto.

100 % DE AREIA + 100% DE CIMENTO (PILOTO)				
Peneira	Abertura (mm)	Massa Retida AREIA (g)	Massa Retida CIMENTO (g)	% Retida Acumulada
4	4,76	0,0	32,4	3,2
8	2,38	0,2	79,7	11,2
16	1,19	0,9	141,2	25,4
30	0,59	2,9	128,4	38,6
50	0,29	208,8	38,1	63,4
100	0,149	728,8	270,1	163,6
200	0,0074	50,4	233,0	192,0
FUNDO	0	3,2	77,1	200,0
Conforme NBR NM 248 : 2003				

Fonte: próprio autor (2019).

Tabela 13 – Granulometria da argamassa com cimento, 90% de areia e 10% de RPPO.

CIMENTO + 10% DE RPPO + 90% DE AREIA					
Peneira	Abertura (mm)	Massa Retida RPPO (g)	Massa Retida AREIA (g)	Massa Retida CIMENTO (g)	% Retida Acumulada
4	4,76	0,0	0,0	-	0,0
8	2,38	0,0	0,2	-	0,0
16	1,19	0,0	0,8	-	0,2
30	0,59	5,9	2,6	-	6,4
50	0,29	36,0	187,9	-	63,8
100	0,149	49,3	655,9	-	186,8
200	0,0074	5,1	45,4	76,0	204,6
FUNDO	0	2,6	2,9	924,0	300,0
Conforme NBR NM 248 : 2003					

Fonte: próprio autor (2019).

Tabela 14 – Granulometria da argamassa com cimento, 85% de areia e 15 % de RPPO.

CIMENTO + 15% DE RPPO + 85% DE AREIA					
Peneira	Abertura (mm)	Massa Retida RPPO (g)	Massa Retida AREIA (g)	Massa Retida CIMENTO (g)	% Retida Acumulada
4	4,76	0,0	0,0	-	0,0
8	2,38	0,2	0,2	-	0,1
16	1,19	0,0	0,8	-	0,2
30	0,59	8,9	2,5	-	6,5
50	0,29	54,0	177,4	-	63,8
100	0,149	73,9	619,5	-	186,8
200	0,0074	7,7	42,8	76,0	204,6
FUNDO	0	3,9	2,7	924,0	300,0
Conforme NBR NM 248 : 2003					

Fonte: próprio autor (2019).

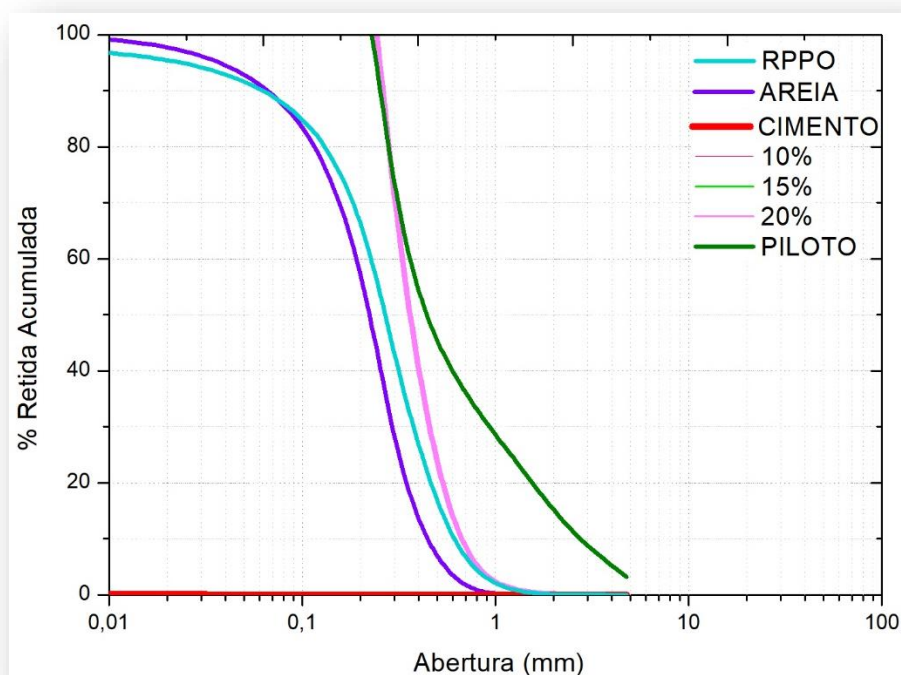
Tabela 15 – Granulometria da argamassa com cimento, 80% de areia e 20% de RPPO.

CIMENTO + 20% DE RPPO + 80% DE AREIA					
Peneira	Abertura (mm)	Massa Retida RPPO (g)	Massa Retida AREIA (g)	Massa Retida CIMENTO (g)	% Retida Acumulada
4	4,76	0,0	0,0	-	0,0
8	2,38	0,2	0,2	-	0,1
16	1,19	0,1	0,7	-	0,2
30	0,59	11,9	2,3	-	6,5
50	0,29	72,0	167,0	-	63,8
100	0,149	98,6	583,0	-	186,8
200	0,0074	10,2	40,3	76,0	204,6
FUNDO	0	5,3	2,5	924,0	300,0
Conforme NBR NM 248 : 2003					

Fonte: próprio autor (2019).

A Figura 41 ilustra as curvas granulométricas dos agregados, aglomerante e das argamassas produzidas. Será evidente a sobreposição das curvas de 10, 15 e 20% de RPPO em substituição da areia, mostrando que as quantidades de resíduos adicionados às massas e as subtrações de areia não foram relevantes para alterar o módulo de finura das 3 misturas:

Figura 41 – Curvas Granulométricas das amostras e das argamassas.



Fonte: próprio autor (2019).

O ensaio granulométrico das amostras destinadas às argamassas cimentícias, apresentou resultados característicos de materiais finos e pulverulentos.

De acordo com os estudos feitos por Bacarji et al., conforme aumenta a quantidade de resíduo (RPPO), gera uma diminuição na resistência à elasticidade (rigidez), chegando a cerca de 40% do valor inicial [56].

Através da análise feita sobre a granulometria do resíduo utilizado, pode-se esperar que ele assuma um papel de enchimento na mistura, preenchendo os espaços vazios entre os agregados. E assim, a densidade de empacotamento e a resistência é melhorada, além, dos poros serem diminuídos [60, 66], e possuir também uma melhora na coesão da argamassa ou até mesmo do concreto, nesse sentido, coesão é a força de atração entre átomos e moléculas em um corpo, impedindo-o de quebrar com facilidade.

Levando em conta as pesquisas de Zhang et al., o efeito de enchimento torna a argamassa menos porosa, com uma permeabilidade menor e uma absorção de água pequena [67].

De acordo com os estudos de Hasan et al., o RPPO por assumir efeito de enchimento, ajuda no processo de hidratação do cimento fazendo com que a porosidade da massa diminua [68]. Também para Pera et al., o resíduo de mármore atua como enchimento entre os agregados e participa das reações de hidratação inicial do cimento, devido a sua grande quantidade de

carbonato de cálcio [69]. A mesma quantidade de carbonato de cálcio foi encontrada também no resíduo dessa pesquisa, onde pode ser visto no ensaio de DRX, relatado na formula de calcite (CaCO_3), então, o efeito de enchimento do RPPO pode se fazer presente nas chapas fabricadas, onde poderá ser visto melhor no ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura.

Ramachandran, Jain e Garg, foram estudantes também desse efeito do resíduo e chegaram a mesma conclusão que Pera et al., a quantidade de carbonato de cálcio no RPPO faz com que tenha influência sim no processo de hidratação [70, 71].

Já Corinaldesi et al., tem uma definição diferenciada para o RPPO, mesmo que ele tenha o papel de enchimento, não consegue atuar no processo de hidratação do cimento, melhor dizendo, ele não apresenta reação entre o cimento e a água, no que diz respeito a sua cura [55].

Todos os autores citados acima, não hesitaram em defender a ideia de que o RPPO não assume o papel de enchimento entre os agregados da mistura, mas Demirel em suas pesquisas comprovou esse efeito do RPPO, tornando uma característica válida e estudada [72].

Nas análises de Kelestemur et al., os espaços vazios foram preenchidos pelo RPPO devido aos tamanhos de seus grãos, que por sinal foram menores do que o agregado principal, a areia, assim, garantindo uma porosidade menor da massa [60]. Então, pode ser que não aconteça o mesmo nessa pesquisa, pois os grãos de areia utilizados aqui foram menores do que o RPPO, mesmo resíduo utilizado por Kelestemur et al.

Com os dados obtidos nesse ensaio, é possível calcular o consumo de aglomerante, segue na Tabela 16:

Tabela 16 – Consumo de aglomerante em porcentagem.

Argamassas: (passante #200 / Σ retida #4 à #200)	Consumo: [(aglomerante / #200) x 100]
0% $\rightarrow$ 1,63	2,55 %
10% $\rightarrow$ 0,65	0,49 %
15% $\rightarrow$ 0,65	0,49 %
20% $\rightarrow$ 0,65	0,49%

Fonte: próprio autor (2020).

Como já dito, quanto mais próximo de 1 for a porcentagem retida na peneira #200, maior será a compactidade e continuidade no perfil da curva granulométrica da argamassa. Com isso, analisando as Tabelas 12 à 15, pode-se ver que a argamassa que mais apresentou curva continua e compacta, é a argamassa piloto, com 0% de RPPO, ressaltando uma porcentagem retida na peneira #200, de 1,92, pois as outras argamassa, com 10, 15 e 20% de RPPO, resultaram em 2,04, chegando à uma diferença maior de 1. Mas como pode-se ver, a diferença foi pequena entre os resultados, onde o acréscimo do resíduo foi responsável por afinar um pouco mais a mistura.

- **Densidade**

De acordo com as características dos agregados e do aglomerante, foi realizado um ensaio de densidade específico para cada.

Inicialmente foram realizados os ensaios dos Frascos, Picnomêtro e Chapman, seguindo à norma NBR NM 52 [39]. Esses dois ensaios foram feitos tanto na areia quanto no RPPO, pois são os agregados das misturas cimentícias. Vale ressaltar que o ensaio do Frasco de Chapman seguia à NBR NM 23 [40], onde foi cancelada e indicado a utilizar à NM 52. Mas mesmo assim, o ensaio de Chapman foi realizado nessa pesquisa para poder comparar e validar resultados.

Já o aglomerante, cimento CPV-ARI, por apresentar caráter pulverulento, deve seguir à NBR 16605, utilizando o Frasco de Le Chatelier, para a obtenção da sua densidade [41]. A Tabela 17 mostra as massas específicas dos agregados e aglomerante que compõem a argamassa cimentícia:

Tabela 17 – Massas específicas dos agregados e do aglomerante.

Massa específica (g/cm³)			
Amostras:	NBR NM 52 (Picnomêtro)	NBR NM 23 (Chapman)	NBR 16605 (Le Chatelier)
Areia	2,58	2,51	-
RPPO	2,73	2,84	-
Cimento CPV-ARI	-	-	3,15

Fonte: próprio autor (2020).

Pode-se notar uma pequena diferença entre os resultados das mesmas amostras, em ensaios de normas diferentes. Isso se deve aos processos diferentes de realização.

O RPPO apresentou uma densidade nos ensaios da NM 52 e NM 23 de 2,7 e 2,8 g/cm³, respectivamente. A diferença dos resultados foi mínima entre os ensaios. Assim, tudo indica que o RPPO é um material mais pesado do que a areia. Então, as chapas serão mais pesadas à medida que for retirando areia e acrescentando o resíduo. Esses resultados serão vistos mais à frente.

O RPPO analisado é constituído de uma grande variedade de pedras ornamentais, advindas de diferentes processos industriais (corte, polimento, formação de sulcos e outros), isso pode justificar de forma superficial, o valor elevado de massa específica desse resíduo, quando comparado com outras substâncias residuais. Esse resíduo quando acrescentado na areia e no cimento, pode gerar boas propriedades à compressão e absorção, devido ao seu alto grau de finura.

Na pesquisa de Corinaldesi et al., Huang, Kelestemur e Topçu et al., os agregados e aglomerante apresentaram massas específicas semelhantes às utilizadas na argamassa produzida [55, 66, 60, 73].

Já para Santos, o estudo foi um pouco diferenciado, analisando apenas o resíduo de mármore e o resíduo de mármore e granito misturados, e os valores obtidos foram distintos ao dessa pesquisa, pois o resíduo utilizado aqui, apresenta parcelas de ardósia, que são rochas encontradas na região de Presidente Prudente [74].

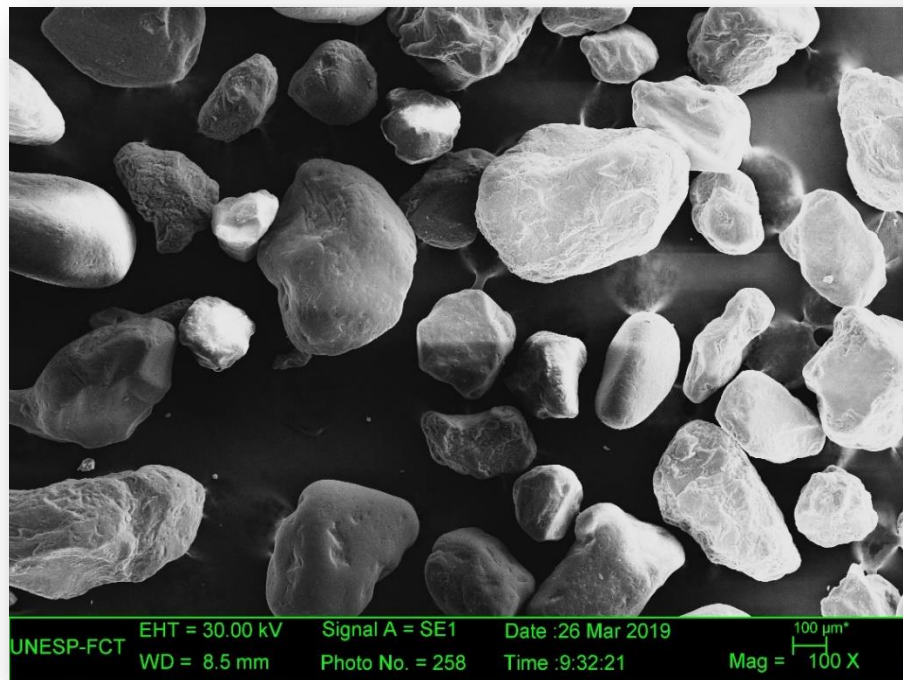
De acordo com a ASTM C 616M-15, o resíduo de marmoraria que apresentar um percentual de sílica entre 60 e 90%, deve possuir densidade maior que 2 g/cm³ e menor que 2,4 g/cm³ [75, 76]. Então o resíduo utilizado, o RPPO, apresentou cerca de 64% de sílica, como visto no ensaio de fluorescência de raio-X, mas resultou em uma densidade de 2,7 g/cm³, maior do que o parâmetro determinado pela ASTM, sendo uma pequena diferença para mais, de apenas 0,3 g/cm³. Presumivelmente, não causando alterações nos resultados de outros ensaios, ou até mesmo da chapa cimentícia fabricada.

As massas unitárias dos agregados (areia e RPPO) e do aglomerante (cimento CPV-ARI), foram mostradas na Tabela 4. Todas as amostras calculadas apresentaram massas adequadas como as já existentes em pesquisas anteriores.

- **Microscopia Eletrônica de Varredura**

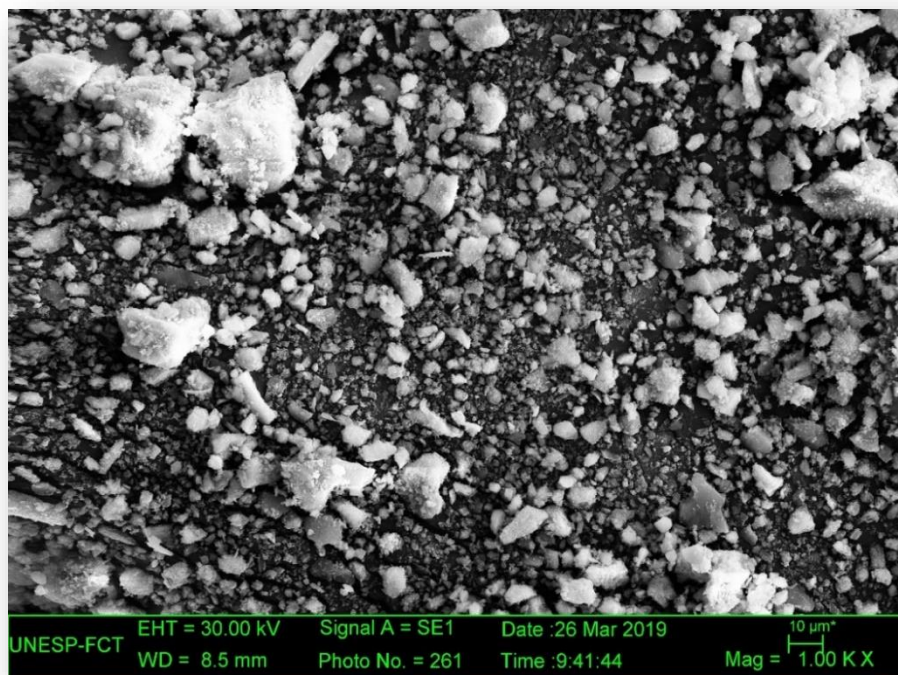
O ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura apresentou resultados importantes sobre a interação dos materiais, podendo observar a presença dos elementos químicos nas chapas, através do ensaio EDS. Para identificar melhor cada agregado e aglomerante na mistura, foi feito o MEV de cada um separadamente, e depois das chapas. As Figuras 42 à 46 mostram a microscopia de cada agregado e do aglomerante:

Figura 42 – MEV da areia natural de rio com ampliação de 100x.



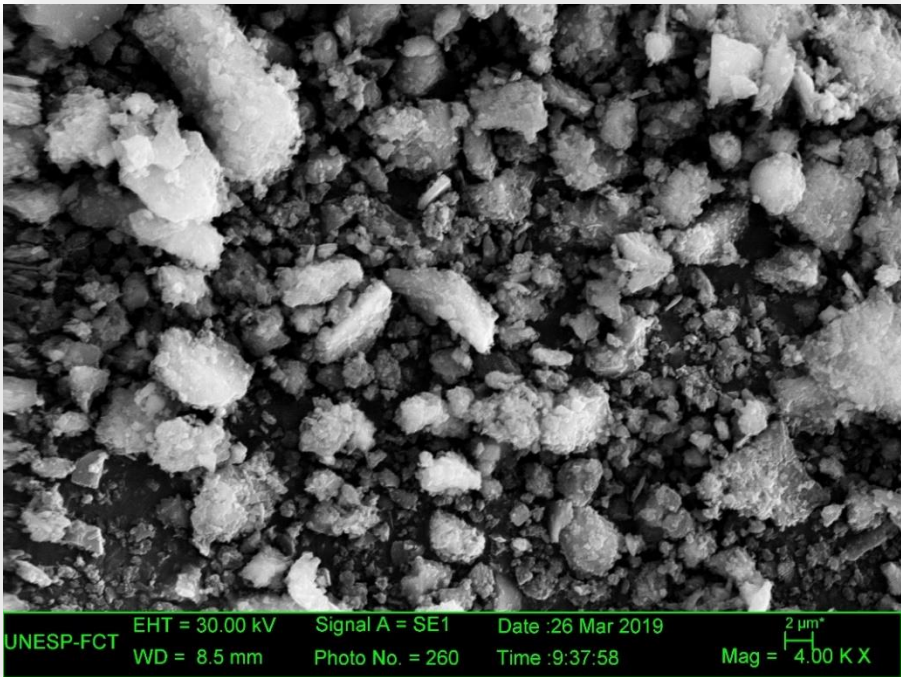
Fonte: próprio autor (2019).

Figura 43 – MEV do cimento CPV-ARI com ampliação de 1000x.



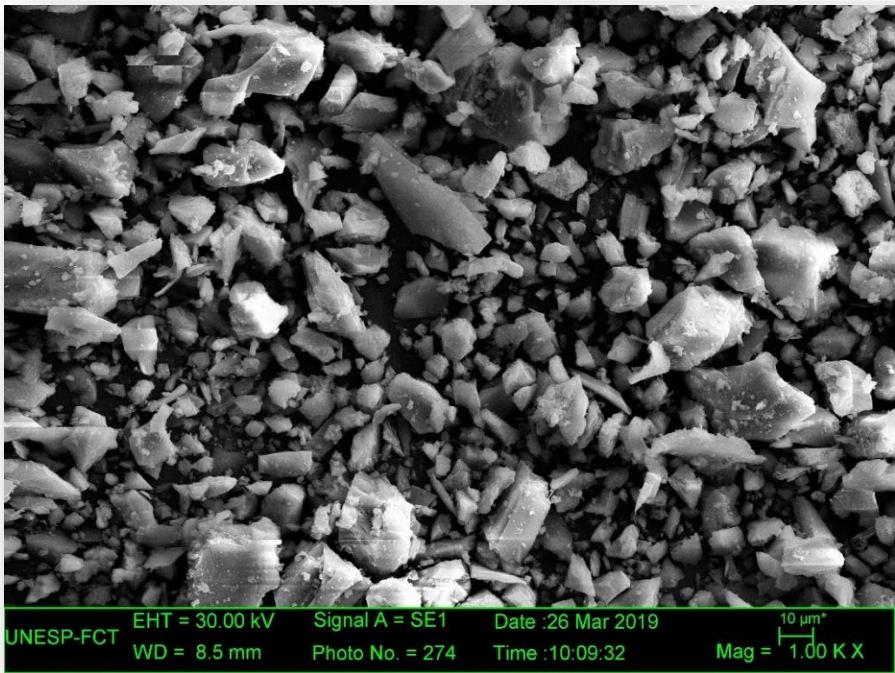
Fonte: próprio autor (2019).

Figura 44 - MEV do cimento CPV-ARI com ampliação de 4000x.



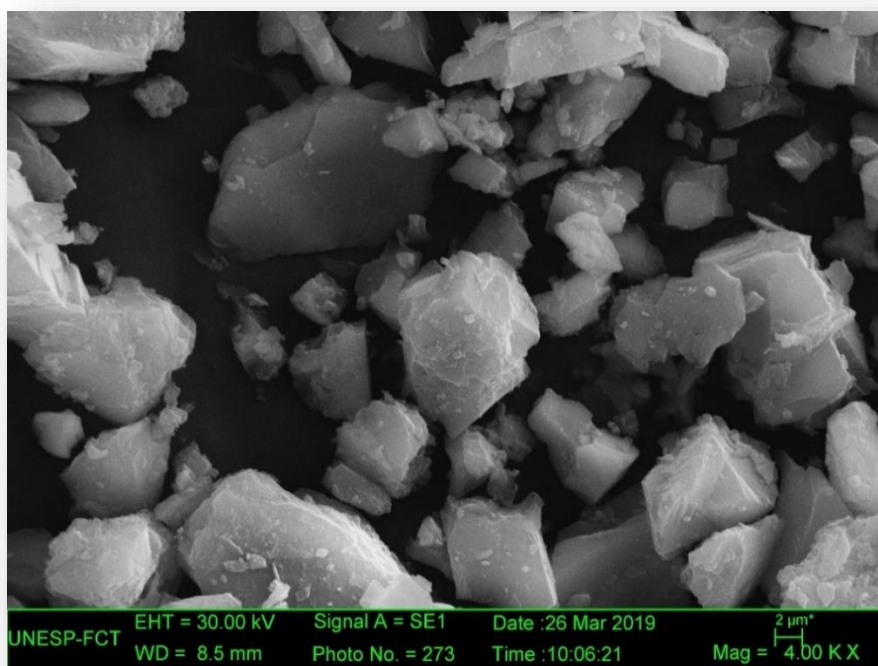
Fonte: próprio autor (2019).

Figura 45 – MEV do RPPO com ampliação de 1000x.



Fonte: próprio autor (2019).

Figura 46 – MEV do RPPO com ampliação de 4000x.



Fonte: próprio autor (2019).

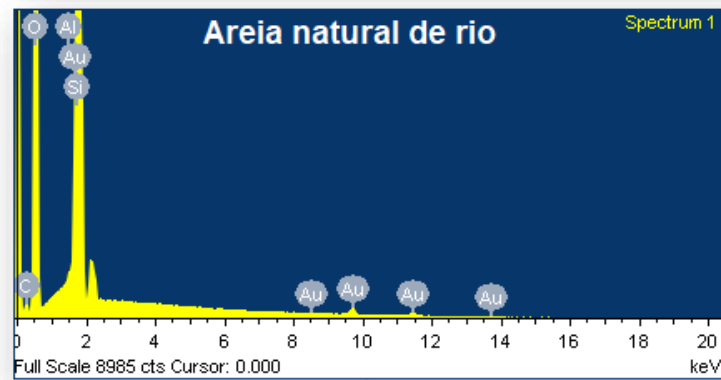
A areia foi apresentada em apenas uma ampliação, 100x, suficiente para analisar os formatos dos seus grãos. Já o cimento e o RPPO, foi necessário uma ampliação maior para obter mais detalhes dos grãos, sendo escolhidas as imagens com 1000 e 4000x de aumento.

Como pode-se observar, a areia apresenta formatos mais cristalinos, grãos maiores e compactos, caracterizando o quartzo, mineral com maior predominância nesse agregado, segundo os ensaios de FRX e DRX. A ampliação da Figura, gera uma ideia de grãos admiráveis, mas como já visto no ensaio de granulometria, a areia utilizada na mistura apresenta uma classificação de muito fina.

O cimento CPV-ARI apresentou grãos com formatos mais irregulares, sem uma predominância de geometria. No ensaio granulométrico, o cimento foi classificado como pulverulento, e assim, pode-se afirmar que seus grãos são muito finos, aglomerando-se entre si, como visto nas Figuras do MEV, passando um aspecto visual embaçado e indefinido.

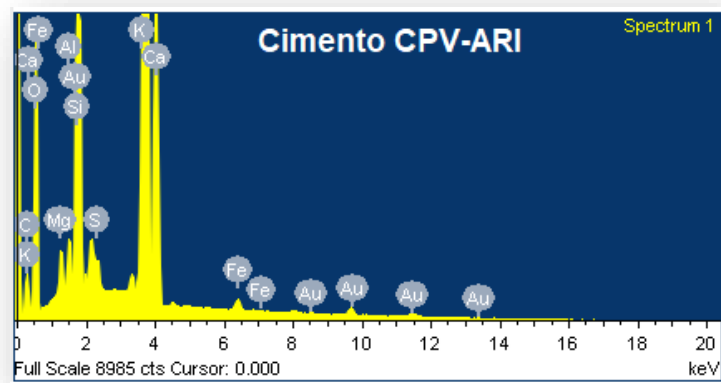
Já o RPPO se caracterizou por apresentar grãos pontiagudos, parecendo fagulhas e outros mais quadriculados, bem característico da presença de óxido de silício no resíduo em questão, como já analisado nos ensaios de FRX e DRX. As Figuras 47 à 49 mostram o ensaio de EDS dos agregados:

Figura 47 – EDS da Areia.



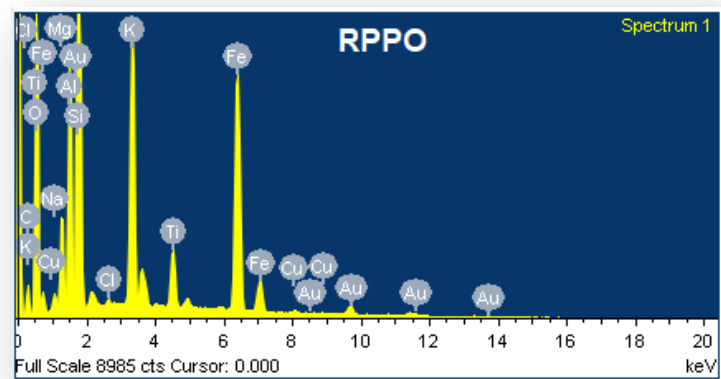
Fonte: próprio autor (2019).

Figura 48 – EDS do Cimento CPV-ARI.



Fonte: próprio autor (2019).

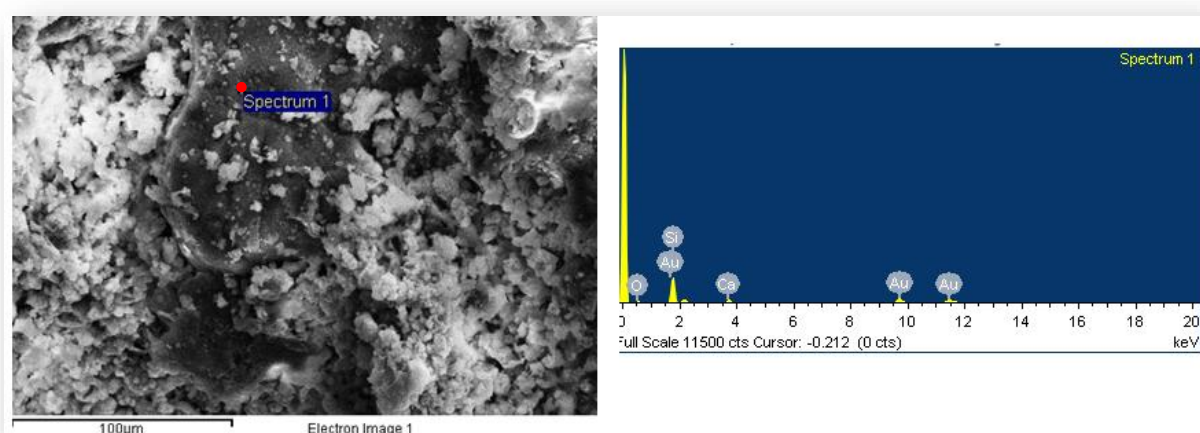
Figura 49 – EDS do RPPO.



Fonte: próprio autor (2019).

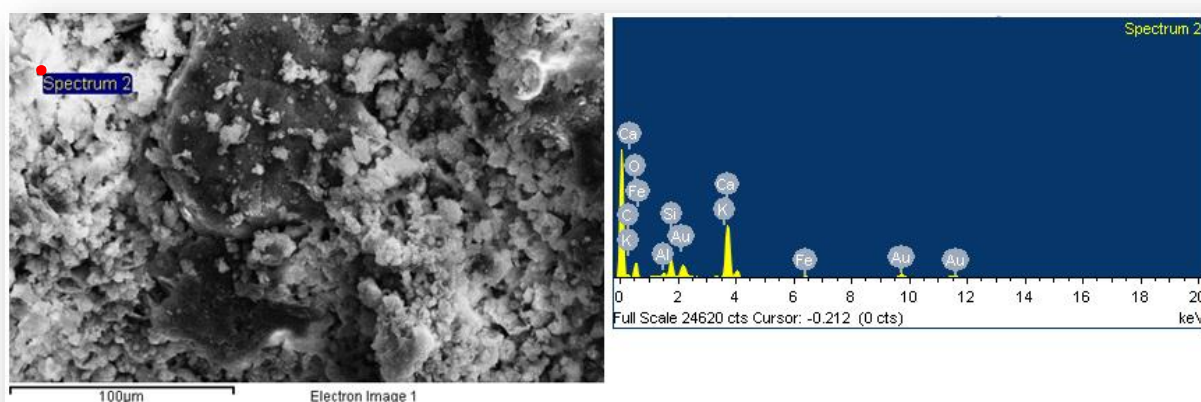
O ensaio de EDS (Espectroscopia de Energia Dispersiva), apresentou os mesmos elementos químicos da areia, cimento e RPPO, já detectados no ensaio de FRX e DRX. Os elementos carbono e oxigênio não apareceram nos ensaio acima citados, pois não são detectados fora do vácuo. A grande presença de ouro no ensaio EDS das amostras, é justificada pelo envelopamento de ouro que os agregados e o aglomerante sofreram para a realização do MEV. As Figuras 50 à 52 representam a composição química indicada em pontos selecionados:

Figura 50 – Definição da forma estrutural da areia por meio da composição química detectada no EDS dessa amostra.



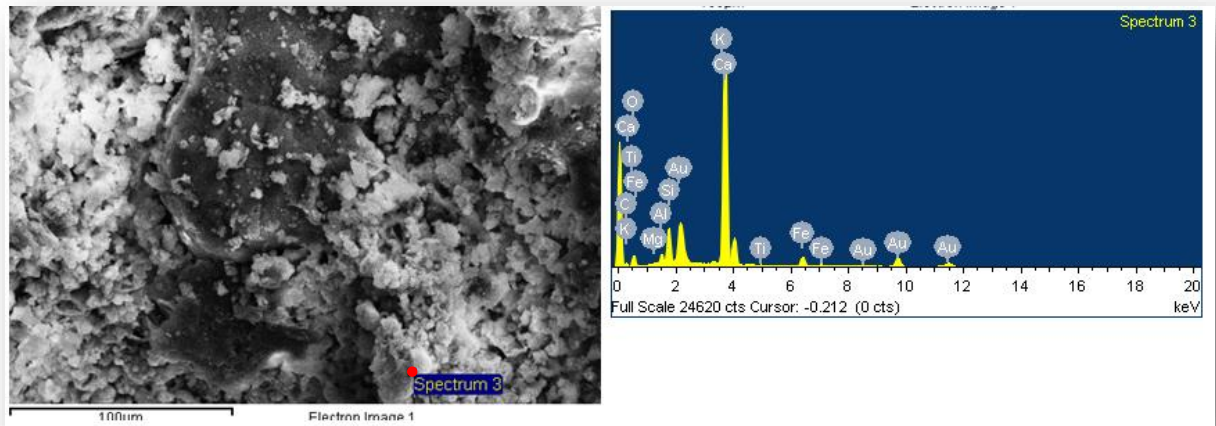
Fonte: próprio autor (2019).

Figura 51 - Definição da forma estrutural do cimento por meio da composição química detectada no EDS dessa amostra.



Fonte: próprio autor (2019).

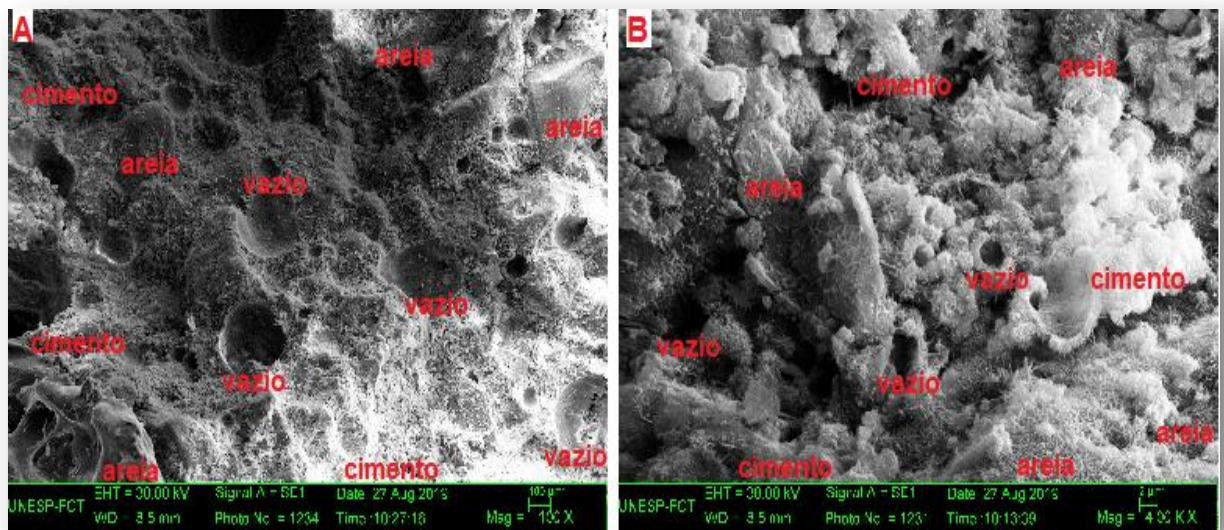
Figura 52 - Definição da forma estrutural do RPPO por meio da composição química detectada no EDS dessa amostra.



Fonte: próprio autor (2019).

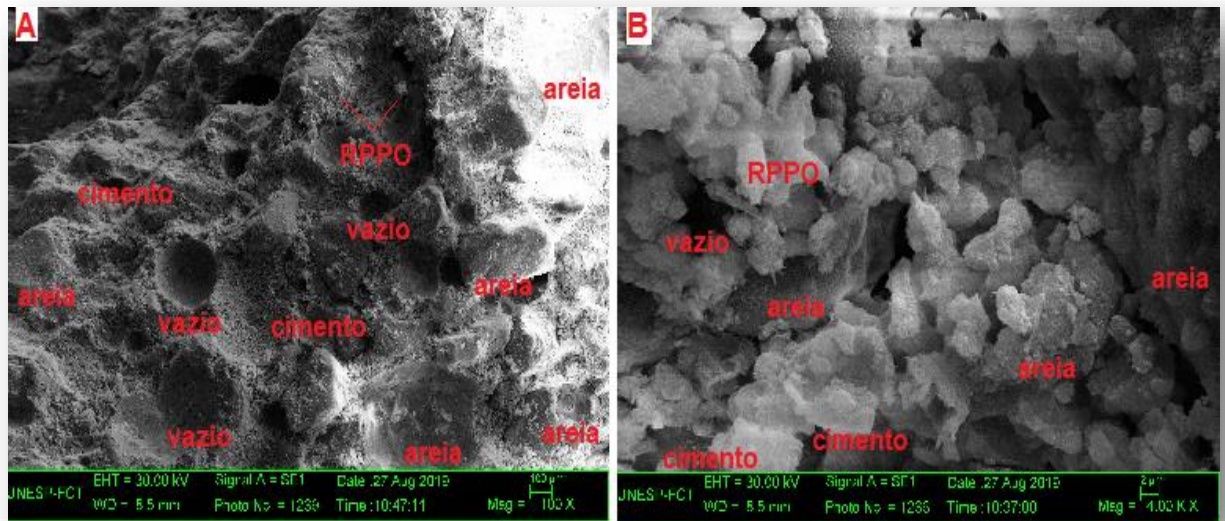
Pode-se notar que os spectrum analisados foram bem característicos de cada agregado e aglomerante detectado. As Figuras 53 à 56 mostram as junções dos agregados e aglomerante:

Figura 53 – MEV da chapa com 0% de RPPO, ampliação de (A) 100x; (B) 4000x.



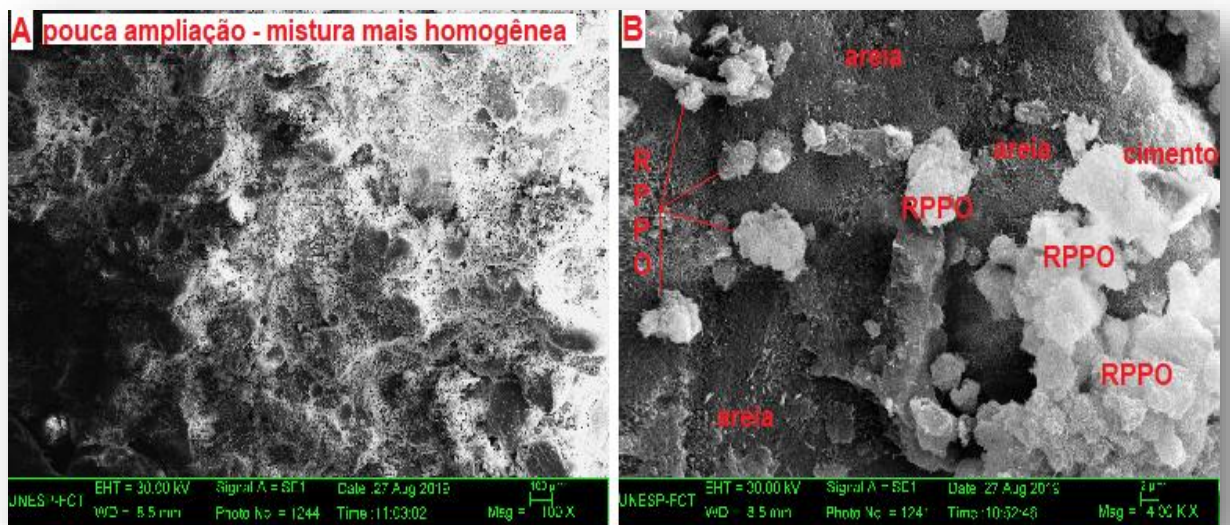
Fonte: próprio autor (2019).

Figura 54 – MEV da chapa com 10% de RPPO, ampliação de (A) 100x; (B) 4000x.



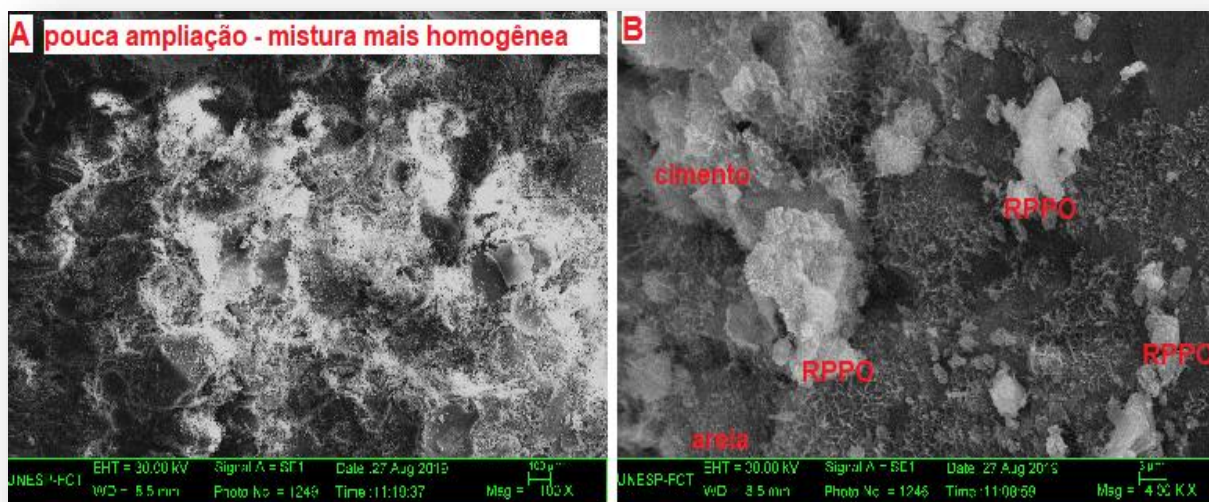
Fonte: próprio autor (2019).

Figura 55 – MEV da chapa com 15% de RPPO, ampliação de (A) 100x; (B) 4000x.



Fonte: próprio autor (2019).

Figura 56 – MEV da chapa com 20% de RPPO, ampliação de (A) 100x; (B) 4000x.



Fonte: próprio autor (2019).

Pode-se observar que na chapa piloto (0% de RPPO), a ausência de resíduo faz com que a mistura apresente maior quantidade de vazios em relação as chapas que contém o RPPO, assim podendo gerar menor resistência mecânica, além de ser muito propício a maior absorção de água.

Conforme o resíduo foi acrescentado à mistura, as chapas começaram a ficar mais homogêneas, devido ao efeito de enchimento do RPPO, já comentado no ensaio granulométrico, eliminando a maior parte de vazios e garantindo uma maior aderência entre os agregados e o aglomerante. Nas Figuras 55 (A) e 56 (A) fica evidente essa característica do resíduo.

Foi analisado também, nas Figuras com 4000x de ampliação, que o cimento apresenta um aspecto mais fibroso. A conclusão de que tais formatos de fibras dizem respeito ao cimento, se deve à presença delas tanto na microscopia das chapas pilotos, quanto nas microscopias com o resíduo. Dúvida poderia surgir na possibilidade de o aspecto fibroso advir da areia, já que ela é um agregado comum em todas as chapas. Essa dúvida rapidamente é afastada quando recorda-se o ensaio de FRX e DRX, em que na sua composição existe o quartzo, um mineral irregular e com formatos de cristais, incompatível com as fibras. Outra constatação que reafirma essa ideia, é o cimento ser pulverulento, podendo assumir qualquer formato.

Segundo Bacarji, o grau de hidratação da mistura, ou seja, a quantidade de água presente na argamassa, pode influenciar no contato entre os agregados e o aglomerante, resultando em diferentes graus de aderência entre ambos. Tudo indica que, nessa pesquisa o fator

água/cimento, foi ideal para garantir uma boa interação entre os agregados e o aglomerante, nas chapas com a presença de RPPO, pois na chapa piloto foi detectado a presença de vazios, que podem ser resultantes da ausência do resíduo para gerar enchimento na massa [56].

As chapas com o resíduo apresentaram uma maior coesão entre os agregados e aglomerante, consequentemente uma melhor fluidez também, podendo ser explicado esse comportamento da massa, analisando o ensaio granulométrico, onde há a presença de muitos finos [55].

A substituição de 5% ou mais de areia por RPPO à argamassa melhora a porosidade [57], sendo evidente nesse ensaio, com a diminuição dos vazios nas chapas de 10, 15 e 20% de RPPO.

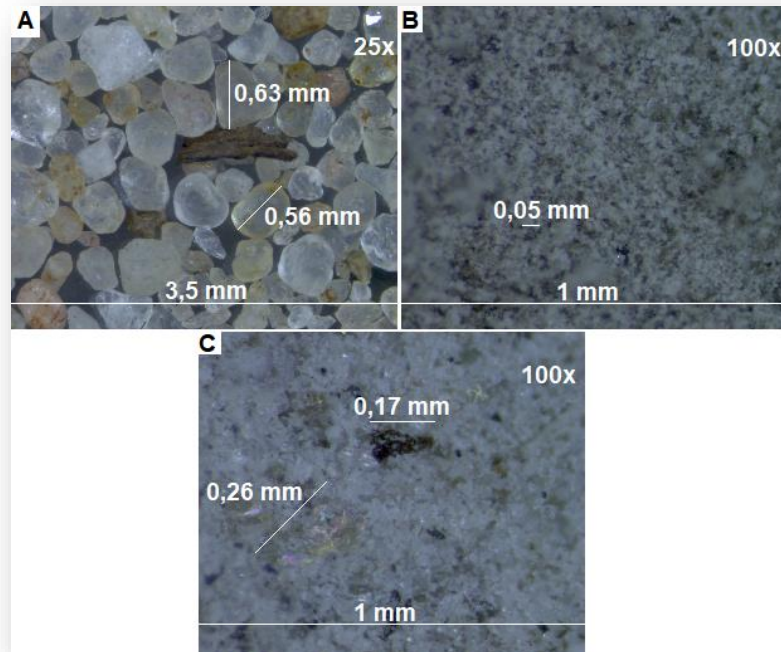
Nos estudos de Huang, verifica-se que a amostra de argamassa sem a presença de RPPO, apresenta muitos vazios, com ar incorporado, devido a formação de grandes cristais e microestruturas soltas [66]. Já na pesquisa de Kristulovic et al., as amostras com RPPO se mostraram mais compactas e menos porosas do que a amostra padrão [59]. As ideias desses dois autores se mantiveram semelhantes ao acontecido nessa pesquisa.

As imagens do MEV adquiridas por Kelestemur, em suas análises sobre o RPPO, se apresentaram muito semelhantes as obtidas nessa pesquisa [60]. Segundo Awad et al., a melhor adesão da argamassa se faz presente em amostras com partículas menores [61]. Assim, tudo indica que a argamassa produzida para as chapas cimentícias apresenta uma boa adesão entre os agregados e aglomerantes, como já dito anteriormente, além de uma boa deformação elástica, permitindo o corpo de prova voltar ao seu estado inicial depois de sofrer uma tensão.

- **Microscopia Óptica**

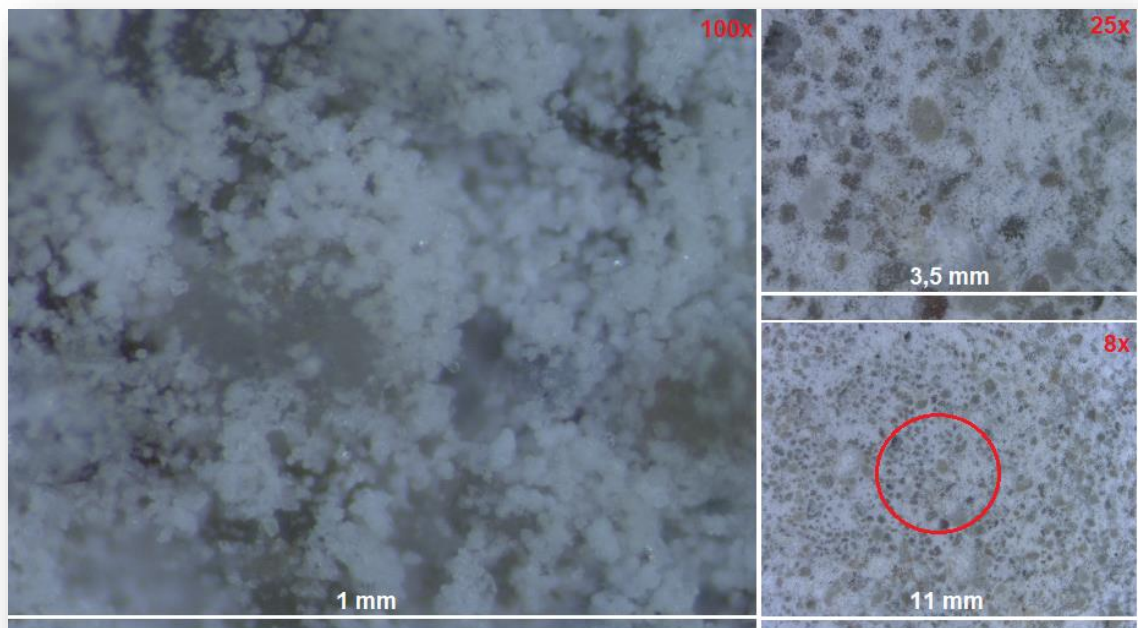
Com a realização, em primeiro lugar, da microscopia dos agregados e aglomerante, foi possível analisar de forma correta as imagens geradas referentes às chapas, graças à facilidade de identificação de ambos. As Figuras 57 à 59 mostram a interação entre os agregados e aglomerante constituintes das chapas:

Figura 57 – (A) Ampliação de 25x dos grãos de areia. (B) Ampliação de 100x do cimento CPV-ARI. (C) Ampliação de 100x do RPPO.



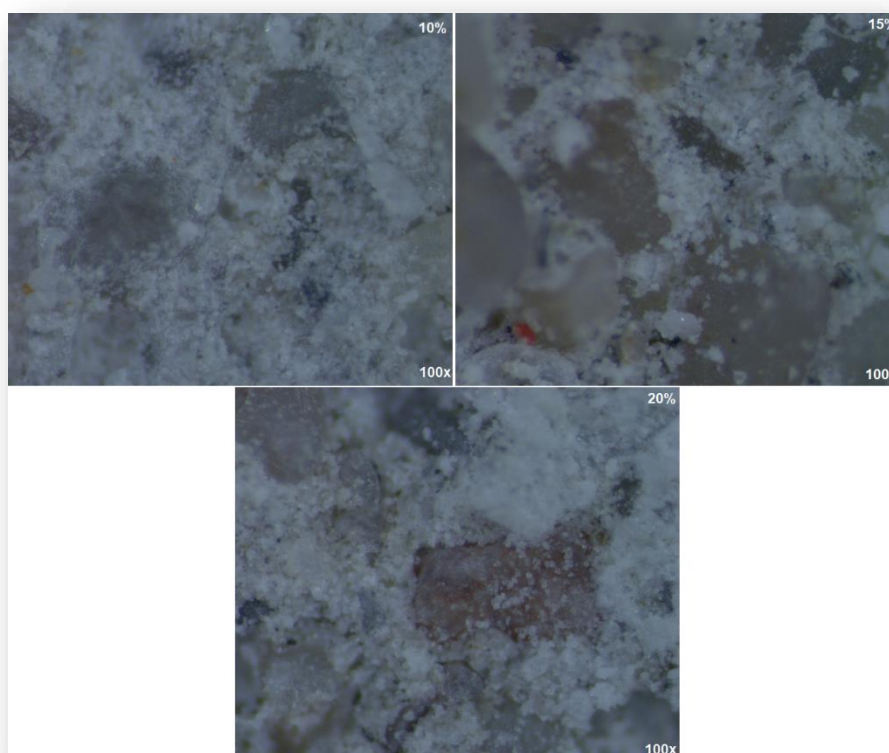
Fonte: próprio autor (2019).

Figura 58 – Interação da chapa de 0% de RPPO – Piloto.



Fonte: próprio autor (2019).

Figura 59 - Interação das chapas de 10, 15 e 20% de RPPO.



Fonte: próprio autor (2019).

Pode-se observar que a areia apresenta os grãos maiores e bem definidos, sendo fácil de ser detectada na mistura. Já o cimento e o RPPO possuem aspectos parecidos, podendo ser bem confusas as suas detecções. Eles diferem entre si na cor, pois o cimento tem menos brilho, caracterizando-se mais fosco e escuro; já o RPPO é mais brilhoso e apresenta uma cor mais clara. Os tamanhos dos grãos são bem parecidos nas imagens, diferenciando-se apenas no caráter pulverulento do cimento, não constatável no RPPO, ainda que seja fino. Assim, supostamente a junção do cimento com o RPPO é bem homogênea, não apresentando fases distintas, ou seja, os dois incorporam bem os grãos de areia, garantindo melhor resistência para às chapas.

Comparando a amostra piloto com as demais (10, 15, e 20% de RPPO), está evidente que nas chapas pilotos a areia e o cimento estão bem misturados, e como já visto, existe apenas a presença da cor mais fosca e escura, caracterizando o cimento, sem o resíduo. Já nas chapas que foram incorporado o RPPO, apresentam uma cor mais clara, e com mais brilho.

Na chapas com 10% observa-se a pouca presença de resíduo e mais grãos de areia, caracterizados em maiores dimensões e com maior solidez. Já o cimento se fez mais presente do que o RPPO, podendo notar pela textura e pela cor mais escura da imagem.

Na chapa com 15% de resíduo, nota-se uma presença maior de RPPO, mas com pouca diferença visual e textural.

Já na chapa com 20% de resíduo, a presença deste se fez mais evidente, pelo alto brilho, cor mais clara, e maior aderência com o cimento, onde presumivelmente, os dois encapsulam bem os grãos de areia, o que pode gerar uma absorção de água menor, por ser um material bem compacto. Está mais claro nesse ensaio o papel que o resíduo executa na mistura, de enchimento, podendo notar a sua ótima relação com o cimento e a areia.

• Absorção de água

O ensaio de absorção de água foi feito pelo método de imersão em água fria. As chapas foram submetidos ao ensaio, como forma de validar o ensaio mecânico de impacto. Também se obteve resultados e justificativas quanto à porosidade do material analisado, de modo que quanto mais água absorver, mais poroso será o material e, conseqüentemente menor será a resistência mecânica.

A Tabela 18 apresenta os valores de absorção obtidos e seus respectivos desvios padrões:

Tabela 18 – Absorção de água das chapas (%) – Média – Desvio Padrão.

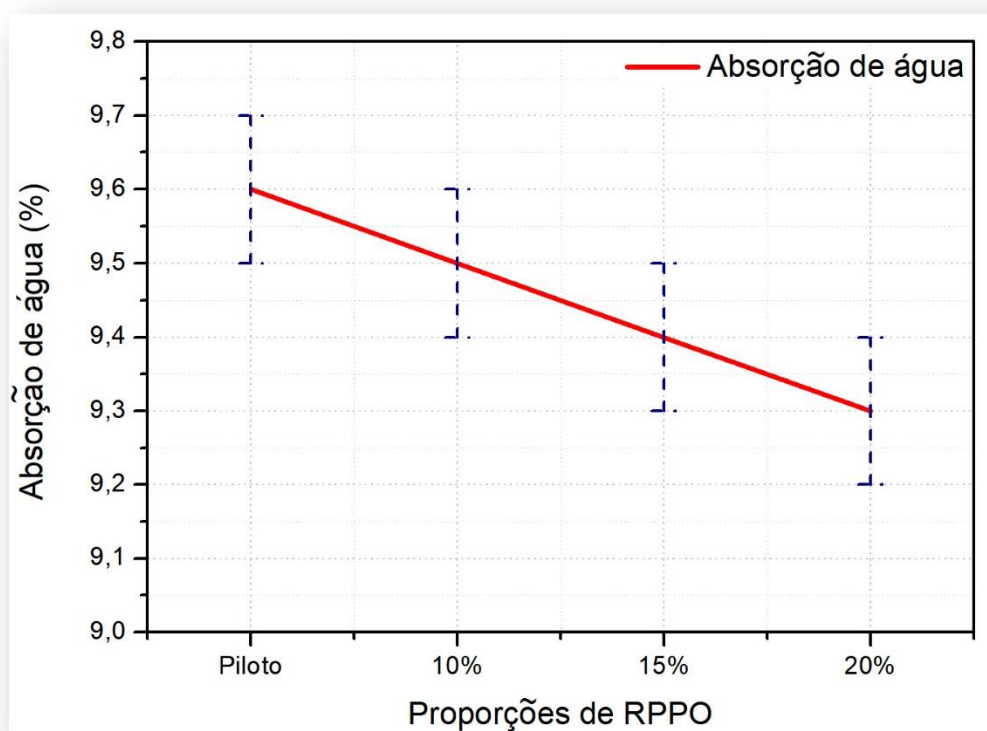
CHAPAS (médias de 3 Cps)	PILOTO	10%	15%	20%
Secos em temp. ambiente	1110 g	1204 g	1240 g	1243 g
72 h de estufa (ms)	1100 g	1183 g	1221 g	1226 g
72 h imersos em água (mu)	1217 g	1307 g	1348 g	1351 g
$AA (\%) = \frac{m_u - m_s}{m_u} \times 100$				
Absorção AA (%)	9,6	9,5	9,4	9,3
$DP = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - M_A)^2}{n}}$ DP = desvio padrão Xi = valor na posição i no banco de dados Ma = média aritmética dos dados n = quantidade de dados				
Desvio Padrão	0,1	0,1	0,1	0,1

Fonte: próprio autor (2020).

Como se pode observar na Tabela acima, foram analisados 3 corpos de provas de cada proporção, o piloto, 10%, 15% e 20% de RPPO, conforme pede a norma NBR 9778. A média da porcentagem de absorção de água dos corpos de provas pilotos, foi a maior, qual seja, 9,6%, e conforme foi substituindo a areia pelo RPPO, as médias das porcentagens foram diminuindo em 0,1%, visto que, quanto maior a porcentagem de incorporação de RPPO na argamassa, menor será a quantidade de água absorvida pelas chapas.

A Figura 60 mostra em forma linear, os comportamentos das médias de cada proporção de RPPO:

Figura 60 – Gráfico de absorção de água das chapas e Desvio padrão.



Fonte: próprio autor (2020).

O RPPO, por apresentar característica de enchimento, preenche os espaços vazios entre a areia e o cimento, assim tornando um material mais compacto, com menos absorção de água e, conseqüentemente, mais resistente. O processo de hidratação do cimento reduz a porosidade e depende da função de enchimento do RPPO [63].

Segundo a Figura 60, a substituição de 20% de areia por RPPO foi vantajosa por apresentar a menor absorção de água.

A absorção de água indicada para chapas cimentícias destinadas à vedação, deve ser de no máximo 25%, e todas as chapas analisadas tiveram resultados satisfatórios, com uma

porcentagem bem a baixo do permitido, tornando até a amostra piloto adequada para a aplicação desta [29].

A mínima diferença entre as médias de absorções de água, traz a ideia que a quantidade de substituição da areia pelo RPPO, não foi o suficiente para resultados mais distantes e podendo assim, caracterizar melhor a porcentagem adequada, mas levando em conta os resultados obtidos, nas condições possíveis, as chapas com 20% de resíduo foram as mais vantajosas para serem utilizadas em vedações.

Huang et al. defende a teoria que o resíduo do processamento de pedras ornamentais usado como pasta de substituição, que no caso foi a substituição parcial da areia, é muito indicado para garantir uma maior resistência à absorção de água e assim, melhorando a durabilidade da argamassa [66].

Nos estudos de Kristulovic et al., a substituição de 15% de areia pelo RPPO, é a proporção que mais apresenta vantagem em relação à absorção, sendo mais resistente à água [59]. Mas na presente pesquisa, os resultados foram outros, não deixando de afirmar que 15% de resíduo é vantajoso para as chapas, quando diz respeito à absorção, mas os valores mais positivos foram para a proporção de 20% em substituição da areia pelo RPPO.

Souza et al., estudou a absorção de água das pedras ornamentais, e chegou a ideia que, quanto maior a presença de sílica na composição química da rocha, menor será a absorção de água, e essa teoria foi comprovada em seus estudos, através do ensaio de FRX, DRX e absorção de água. Em sua pesquisa, a rocha que apresentou 70% de sílica, visto através do ensaio de FRX, resultou em 8% de absorção de água, sendo um resultado menor ainda do que as porcentagens obtidas na presente pesquisa. No ensaio de FRX, obtiveram-se a quantidade de 64% de sílica, uma porcentagem menor do que adquirida nos estudos de Souza et al., podendo assim, justificar de forma superficial, a maior absorção de água das chapas cimentícias, aqui fabricadas [77].

Nas observações de Awad et al., quanto maior as partículas das amostras presentes na argamassa, menor será a absorção de água, mas não foi o conhecimento obtido nos ensaios aqui realizados, pois no ensaio granulométrico, pode-se ver que as partículas que compõem a argamassa cimentícia produzida, foram muito finas e pequenas, e nem por isso deixou de ter absorções de águas baixas e permitidas pela norma NBR 15498 [61,29].

- **Permeabilidade**

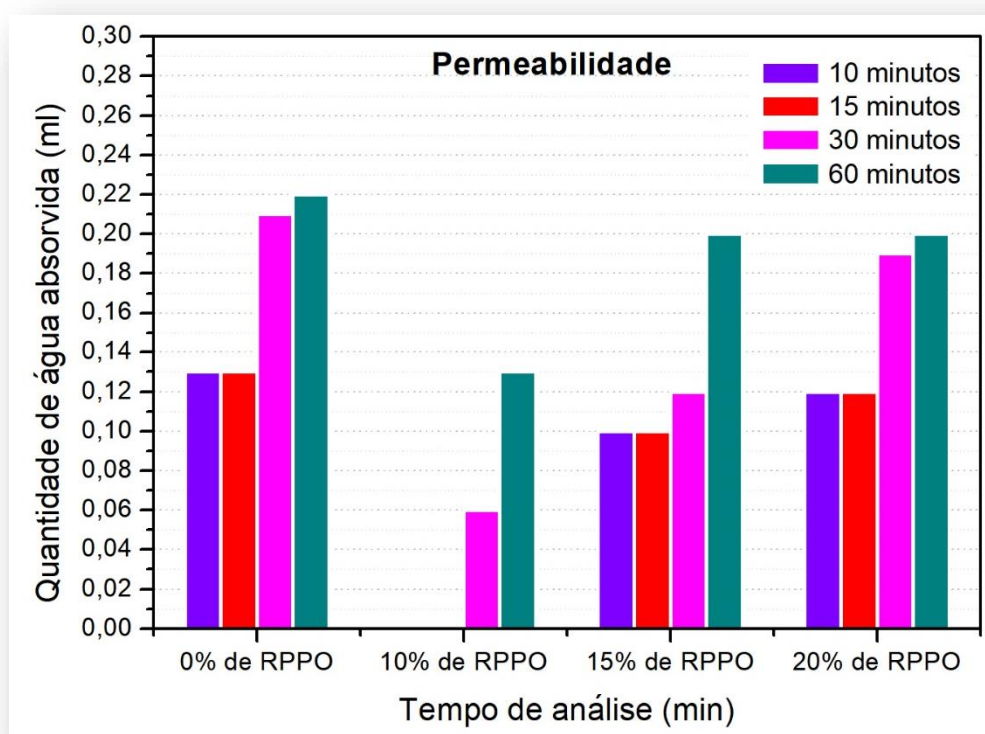
O ensaio de permeabilidade foi feito em 3 chapas cimentícias de cada proporção, e nas chapas foram acoplados 3 tubos de Carsten (cachimbo). Assim, foi feita uma média dos valores e explícitos, como mostra a Tabela 19 e ilustra a Figura 61:

Tabela 19 – Quantidade de água absorvida por cada chapa, em ml.

Permeabilidade				
Média de 3 chapas de cada proporção - Média de 3 cachimbos em cada chapa				
	Tempos de observações:			
Chapas:	10 minutos:	15 minutos:	30 minutos:	60 minutos:
0% de RPPO	0,13 ml	0,13 ml	0,21 ml	0,22 ml
10% de RPPO	0 ml	0 ml	0,06 ml	0,13 ml
15% de RPPO	0,10 ml	0,10 ml	0,12 ml	0,20 ml
20% de RPPO	0,12 ml	0,12 ml	0,19 ml	0,20 ml

Fonte: próprio autor (2020).

Figura 61 – Gráfico de barras com a quantidade de água absorvidas por cada chapa.



Fonte: próprio autor (2020).

Como visto na Tabela e Figura acima, as chapas pilotos, sem a presença de RPPO, foram as que mais absorveram água por permeabilidade, resultando em 0,22 ml, no maior tempo de análise, 60 minutos. Nas chapas com substituição de 10% de areia pelo resíduo, nos 15

primeiros minutos, não absorveram nenhuma quantidade de água, chegando à apenas 0,13 ml nos 60 minutos. Estando bem abaixo das absorções das chapas pilotos.

A medida que foi aumentando a quantidade de RPPO nas chapas, e diminuindo a areia, a absorção por permeabilidades aumentou, resultando em 0,20 ml, nos 60 minutos, tanto nas chapas com 15% de RPPO, quanto nas de 20%. Assim, tudo indica que no ensaio de permeabilidade, a presença de apenas 10% do resíduo é vantajosa, em relação às chapas pilotos, passando disso, começa a aumentar a absorção e assim, podendo gerar queda da resistência.

Pode-se observar também que, nos 15 minutos primeiros de análise, todas as chapas se apresentaram com a mesma quantidade de absorção de água.

De acordo com a NBR 15498, pode aparecer traços de umidade na face inferior das chapas, porém sem surgimento de gotas de água. Todas as chapas foram analisadas visualmente, e nenhuma apresentaram manchas de água na face oposta aos cachimbos, então a argamassa cimentícia endurecida apresenta uma boa resistência à absorção de água por permeabilidade [29].

A Figura 62 mostra um exemplo de como ficou uma das chapas depois do ensaio de permeabilidade:

Figura 62 – Chapa cimentícia após o ensaio de permeabilidade.



Fonte: próprio autor (2020).

Como já dito, e agora observando a Figura 61, pode-se notar a ausência de manchas ou até mesmo gotas d'água.

- **Massas específicas das chapas cimentícias**

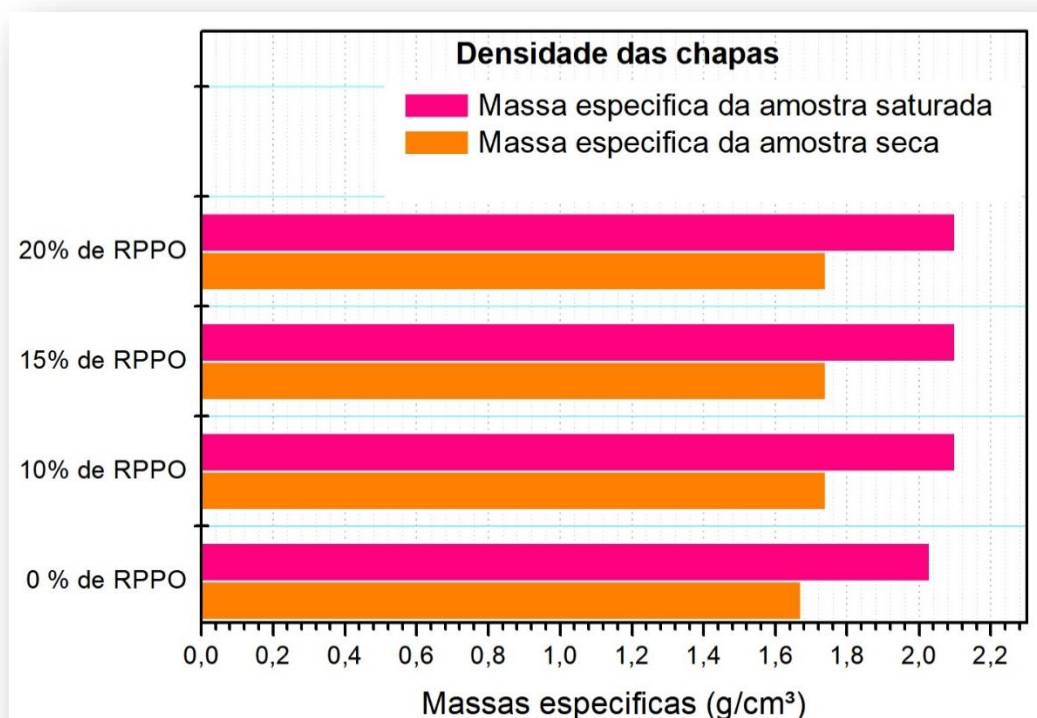
As massa específicas das chapas foram calculadas seguindo à NBR 9778 [47], para isso foi necessário adquirir as massas secas, saturadas e imersas em água. Foram pesadas 3 chapas de cada proporção de RPPO e feito as médias das massas, assim pode-se obter através das equações 13 e 14, as massas específicas secas e saturadas das chapas, onde estão apresentadas na Tabela 20 e Figura 63:

Tabela 20 – Massas específicas das chapas cimentícias.

Massas específicas (g/cm³):		
Chapas:	Amostra seca	Amostra saturada
0 % de RPPO	1,67	2,03
10% de RPPO	1,74	2,1
15% de RPPO	1,74	2,1
20% de RPPO	1,74	2,1

Fonte: próprio autor (2020).

Figura 63 – Ilustração das massas específicas.



Fonte: próprio autor (2020).

Como visto, as chapas com 0% de RPPO, apresentaram massas específicas menores em relação as mesmas com a presença do resíduo. Isso se deve ao fato do resíduo ser mais pesado (denso), do que a areia. Conforme foi tirando a areia, com 2,58 g/cm³ de densidade, e acrescentando o RPPO, com 2,73 g/cm³, a argamassa cimentícia começou a apresentar mais peso, ser mais densa e compacta, consequentemente as chapas com 10%, 15% e 20% de resíduo foram sendo mais pesadas também, quando fabricadas.

A quantidade de substituição da areia pelo RPPO, não foi o suficiente para garantir uma massa específica diferente entre as chapas de proporções distintas.

A massa específica da amostra seca é característica por ser mais leve quando comparada com a massa específica da amostra saturada, pois a presença de água nessa última, faz com que o peso fique maior, tornando-a mais densa.

Segundo Huang et al., a adição do RPPO como pasta de substituição da areia, densifica e melhora a microestrutura da argamassa endurecida, enquanto que a adição do RPPO como substituição de cimento pode provocar a deterioração da microestrutura [66].

- **Índice de vazios das chapas cimentícias**

Os índices de vazios das chapas foram calculados seguindo a equação 15, retirada da NBR 9778 [47], os resultados estão apresentados na Tabela 21 e Figura 64:

Tabela 21 – Índices de vazios das chapas cimentícias.

Chapas cimentícias:	Índice de vazio
0% de RPPO	0,40
10% de RPPO	0,36
15% de RPPO	0,34
20% de RPPO	0,30

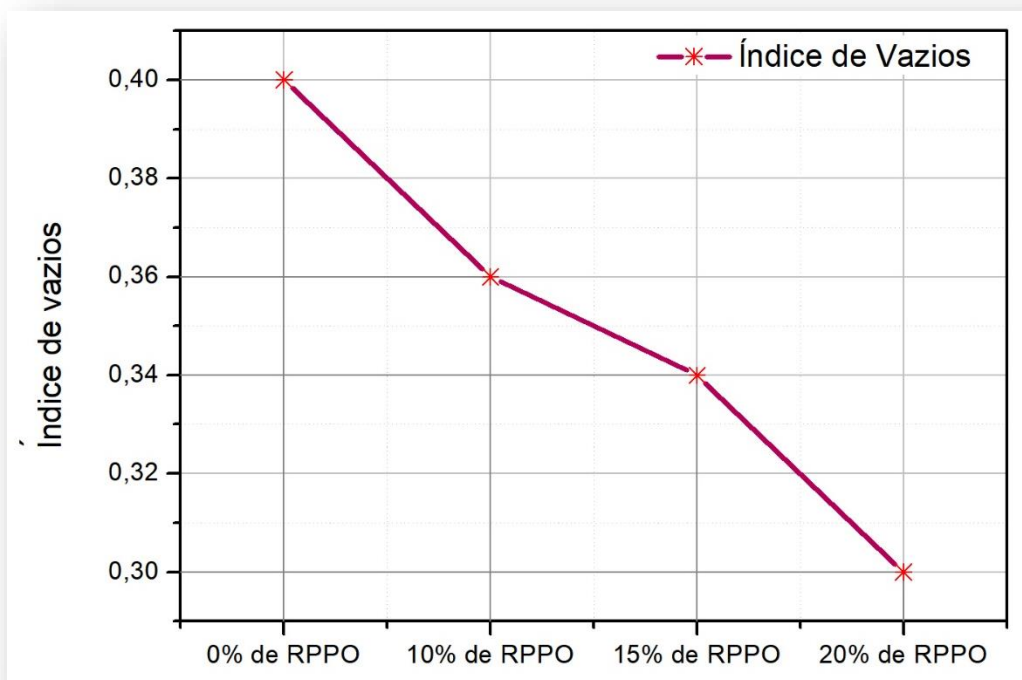
Fonte: próprio autor (2020).

Observando a Tabela e na Figura, pode-se ver que os resultados foram decrescentes à medida que aumentou a quantidade de RPPO na mistura. Mas pode-se notar também, que não foram valores tão distintos, tendo pouca variação entre eles.

Considerando os índices de vazios da chapa piloto e a com 20% do resíduo, teve-se uma diferença de 0,10, mostrando que houve uma redução de vazios na chapa com o resíduo, assim a porosidade foi menor, a densidade maior (como já visto anteriormente) e consequentemente a resistência pode ser mais elevada também.

Por isso que as chapas com a maior quantidade de resíduo, absorveram menos água, no ensaio de absorção.

Figura 64 – Representação linear dos índices de vazios das chapas.



Fonte: próprio autor (2020).

Kristulovic et al., defende a teoria que, a substituição da areia pelo RPPO melhora a porosidade do material, devido ao seu efeito de enchimento [59]. A ideia desse autor, se encaixou perfeitamente nessa pesquisa.

- **Resistencia ao impacto de corpo duro**

O ensaio de impacto foi realizado seguindo à NBR 15575-4 [49], onde uma esfera de 0,5 kg foi solta em movimento pendular, em direção às chapas.

Todas as chapas cimenticias (3 de cada proporção), sofreram os 10 choques gerados pela esfera, à uma altura de 0,5 metro, e nada aconteceu, todos os corpos de provas ficaram intactos ao receberem a energia de impacto de 2,5 Joules.

Depois dos 10 impactos à altura de 0,5 metro, foram realizados mais 10 choques nas mesmas chapas, à uma altura de 0,75 metros, totalizando 3,75 Joules. Mas as chapas cimenticias sem a adição de RPPO e as com 10% de RPPO, não aguentaram esses últimos 10 impactos, romperam em uma média de 6 e 8 choques, respectivamente.

As chapas com 15 e 20% de resíduo, suportaram à carga de 3,75 Joules, apresentando leves lascamentos em suas superfícies.

Mais uma vez o efeito de enchimento do RPPO foi vantajoso, garantindo uma melhor resistência mecânica às chapas, devido à melhor coesão e aderência entre os agregados e aglomerante.

A Figura 65 evidencia a ruptura de uma das chapas que não suportaram os últimos 10 choques, à altura de 0,75 metros:

Figura 65 – Ruptura da chapa cimentícia ao sofrer os impactos ao corpo duro.



Fonte: próprio autor (2020).

Já a Figura 66 ilustra uma das chapas com as leves alterações que sofreu com os impactos:

Figura 66 – Chapa cimentícia com alterações superficiais.



Fonte: próprio autor (2020).

As chapas que suportaram os choques, totalizando uma energia de 3,75 Joules, estão aptas a serem utilizadas tanto em fachadas, quanto em divisórias. Podem receber função estrutural em uma residência de pequeno porte, resultado referente apenas ao ensaio de impacto.

- **Condutividade Térmica/ Resistência Térmica**

O ensaio térmico aqui proposto, permite analisar as condutividades e resistências térmicas das chapas cimentícias fabricadas.

Os cálculos foram obtidos a partir das equações 16 e 17 (Lei de Fourier) já mencionadas anteriormente. Assim, a diferença entre os registros de temperatura da face aquecida para a face oposta da chapa, pode auxiliar nos resultados finais.

Quatro termopares foram fixados na face aquecida da chapa, e outros quatro na face oposta, e assim, foi feito uma média entre as temperaturas acusadas nos termopares de cada face. Com isso pode-se observar a quantidade de calor que a chapa absorveu, dissipou e refletiu.

O ensaio térmico foi realizado em 3 chapas de cada proporção, podendo garantir uma média mais exata das temperaturas. A Tabela 22 mostra os resultados térmicos adquiridos de cada chapa:

Tabela 22 – Condutividades e Resistências térmicas de cada placa.

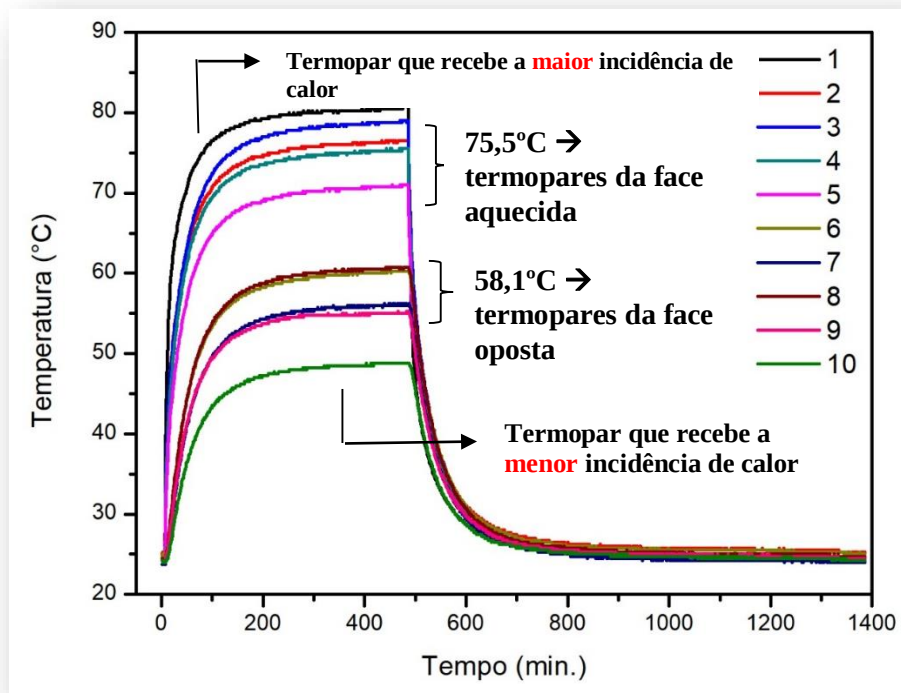
Amostras	Espessura das placas (e)	Variação de temperatura (ΔT)	Condutividade térmica (λ)	Resistência térmica (R)
Piloto (0% de RPPO)	0,02 m	17,4 K	0,1315 w/m.K	0,1522 m ² .K/w
10% de RPPO	0,02 m	15,45 K	0,1480 w/m.K	0,1351 m ² .K/w
15% de RPPO	0,02 m	16,925 K	0,1351 w/m.K	0,1480 m ² .K/w
20% de RPPO	0,02 m	18,0 K	0,1271 w/m.K	0,1540 m².K/w

Fonte: próprio autor (2019).

De acordo com a Tabela, pode-se ver que os resultados térmicos das chapas com 20% de RPPO, foram os mais positivos e vantajosos, apresentando a menor condutividade térmica e consequentemente a maior resistência térmica. A condutividade térmica é inversamente proporcional à resistência térmica, ou seja, quando maior for a condutividade, menor será a resistência, e vice-versa.

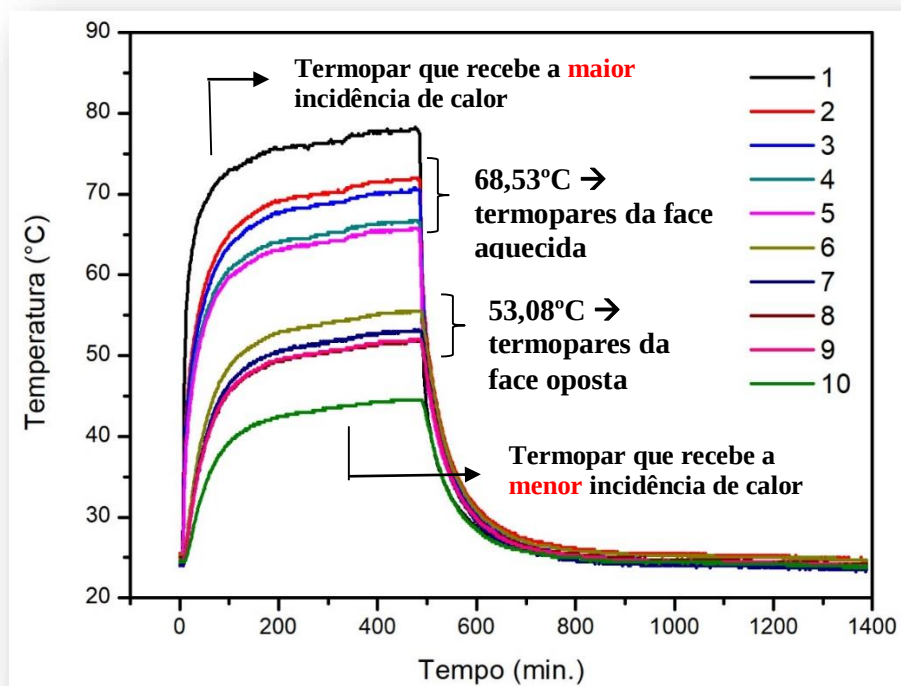
Devido a uma variação de temperatura, a condutividade térmica é a quantidade de calor transferida através de uma espessura, numa direção normal à superfície de área. Já a resistência térmica é a variação de temperatura pela qual o material resiste ao fluxo de calor. As Figuras 67 à 70 representam os gráficos com as curvas térmicas, cada uma com suas respectivas temperaturas:

Figura 67 – Curvas térmicas da chapa Piloto (0% de RPPO).



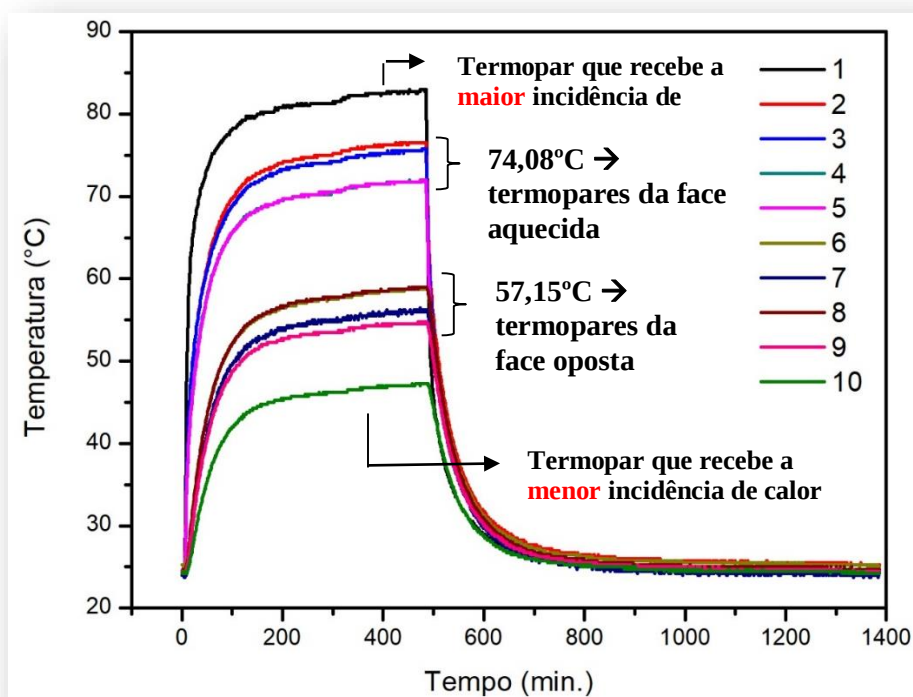
Fonte: próprio autor (2019).

Figura 68 – Curvas térmicas da chapa com 10% de RPPO.



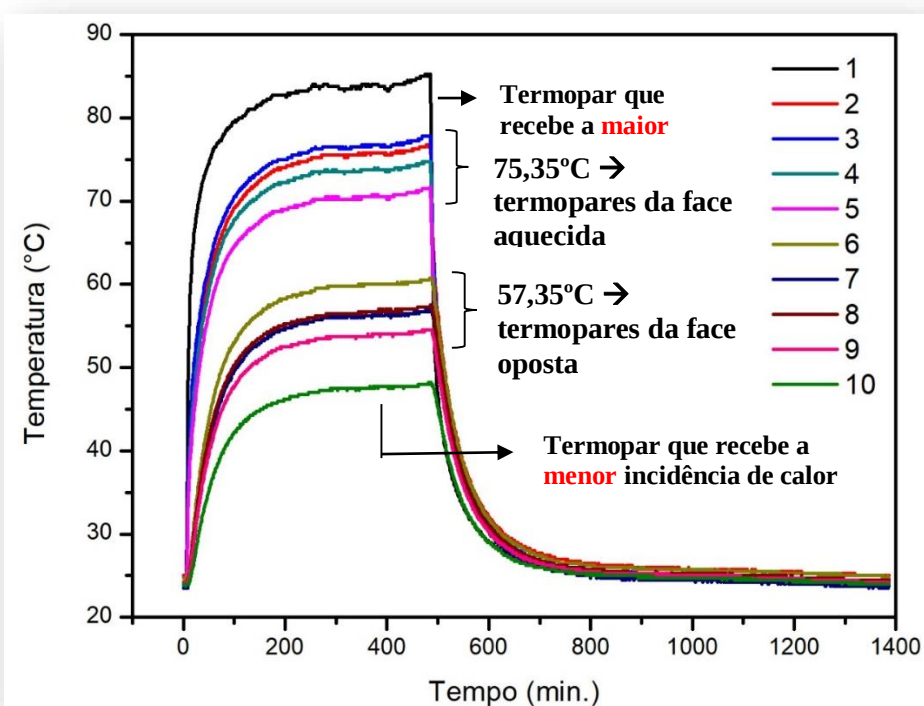
Fonte: próprio autor (2019).

Figura 69 – Curvas térmicas da chapa com 15% de RPPO.



Fonte: próprio autor (2019).

Figura 70 – Curvas térmicas da chapa com 20% de RPPO.



Fonte: próprio autor (2019).

Os gráficos das Figuras 68, 69 e 70 apresentaram uma variação de temperatura, como se pode ver nas curvas mais irregulares, ou com vibrações. Isso ocorre porque o clima nos dias em que os ensaios ocorreram não favoreceu a pesquisa, já que, embora o ambiente interno fosse controlado com ar condicionado (24°C), o ambiente externo estava exposto ao sol, que refletia na face da parede do laboratório, causando algumas interferências na temperatura interna. Nesses dias, portanto, havia instabilidade do clima, o que pode ter contribuído para as interferências constatadas no ensaio.

Santos em 2014, fez um estudo sobre o resíduo de mármore e o de granito, analisando primeiramente a condutividade térmica do mármore, e depois da mistura do mármore com o granito. Assim, obteve resultados positivos, onde o mármore apresentou 0,45 W/mK de condutividade térmica e a mistura de mármore com granito, 0,34 W/mK. Com isso, chegou a teoria que a utilização do mármore com o granito na construção pode garantir um conforto térmico melhor quando comparado com uma estrutura de concreto apenas [74]. As chapas cimentícias analisadas nessa pesquisa, acabaram por apresentar condutividades menores do que as encontradas por Santos, o que eventualmente pode ser vantajoso.

Muhammad et al, também defende a ideia que a utilização do RPPO nas misturas de argamassa e concreto, pode gerar para a edificação um conforto térmico maior, pois apresenta condutividade térmica menor, consequentemente uma resistência térmica maior [58]. E na presente pesquisa não foi diferente, as chapas com 20% de resíduo apresentaram os melhores resultados em relação às presenças menores de RPPO.

Nos estudos de Frota e Schiffer, foi analisado a alta presença de quartzo (óxidos de silício) no resíduo de marmoraria, e com isso conseguiu chegar à resultados positivos, garantindo que a presença desse mineral na massa faz com que a construção tenha um desempenho térmico melhor, pois não absorve muita água e é atômico. Tanto que, a rocha quartzito, composta por quartzo e arenito, é muito indicada para revestir fachadas de edificações, por ser considerada uma “rocha fria”, pois reduz o fluxo de calor nos ambientes internos, uma vez que ao receber a radiação solar, possui baixa propagação das ondas de calor, o que é um aspecto importante para um edifício localizado em clima tropical [78].

Segundo Van Deventer (1971), os componentes da estrutura podem interferir de forma direta no desempenho térmico da mesma, através da transferência de temperatura, pois a troca de calor da construção depende das propriedades térmicas dos materiais que a compõem. A cor superficial da estrutura determina a energia que será absorvida quando exposta à radiação solar, então na medida do possível, deve-se preferir um material, ou composição (agregados e aglomerante), que resulte em cor mais clara, absorvendo assim menos calor e então diminuindo

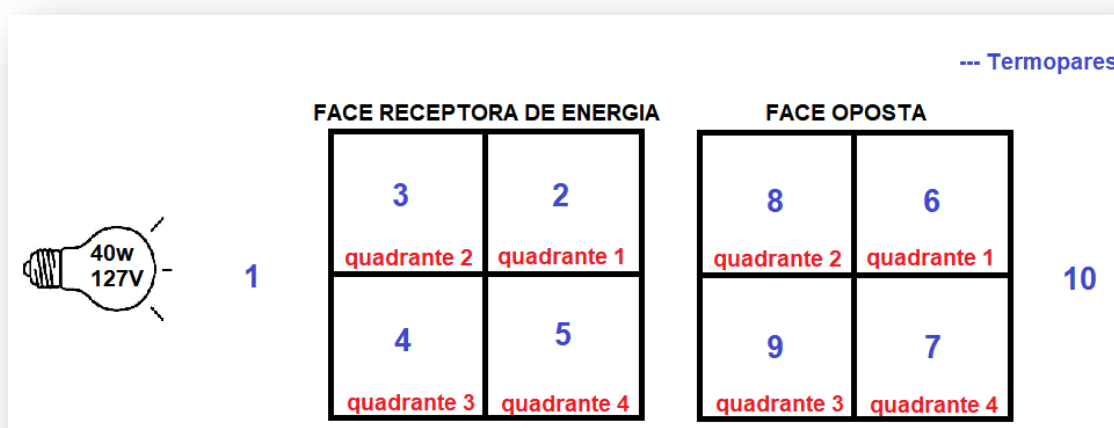
as temperaturas nos ambientes internos das edificações [79]. De acordo com essa ideia de Van Deventer, pode-se dizer que as chapas produzidas nessa pesquisa, absorve menos calor, por apresentar uma cor mais clara quando comparado com chapas de concreto.

O resíduo utilizado nas chapas cimentícias fabricadas, é proveniente da cidade de Presidente Prudente, como já dito, e as rochas que fazem predominância na Região são, mármore, granito e ardósia. Na norma NBR 15220-2, as condutividades térmicas dessas rochas apresentam os seguintes valores, 2,90 W/mK, 3,0 W/mK e 2,2 W/mK, respectivamente [80].

Nas análises de Awad et al., utilizar o mármore e o granito em forma de resíduo para compor a argamassa ou o concreto, junto com outros agregados e aglomerante, pode garantir uma elevada resistência térmica para a construção [61].

A Figura 71 demonstra a disposição dos termopares em seus respectivos quadrantes:

Figura 71 – Termopares e quadrantes.



Fonte: próprio autor (2019).

- **Atenuação Sonora**

O ensaio acústico permitiu analisar a quantidade de som que cada chapa absorveu, em 3 frequências diferentes, sendo, 250, 1000 e 4000 Hz. A análise foi feita em 3 chapas de cada proporção de RPPO e feito uma média dos resultados.

A Tabela 24 mostra as amostras com suas respectivas quantidades de som gerados recebidos:

Tabela 23 – Dados acústicos gerados.

Frequências:	250 Hz	1000 Hz	4000 Hz	250 Hz	1000 Hz	4000 Hz
Amostras:	Decibéis gerados (dB)			Decibéis recebidos (dB)		
0% de RPPO	79	87	86	66	70	73
10% de RPPO	79	88	90	61	63	65
15% de RPPO	78	87	90	60	63	65
20% de RPPO	80	88	92	59	64	67

Fonte: próprio autor (2019).

Como pode-se observar, os melhores resultados foram na frequência mais alta, 4000 Hz, sendo apenas a chapa piloto, apresentando o pior resultado nessa frequência. Então, tudo indica que, ao substituir a areia pelo RPPO, a chapa desempenha uma função melhor de isolamento acústico em todas as frequências analisadas, destacando os maiores decibéis absorvidos na alta frequência (4000 Hz).

Todas as chapas, em diferentes proporções, absorveram 25 dB, menos as pilotos, absorvendo apenas 13 dB, na maior frequência.

Já em menores frequências, como na 1000 Hz e 250 Hz, as chapas que se mantiveram mais isolantes acústicas, foram as de proporções de 10%. E pra finalizar, na frequência 250 Hz, as chapas com 20% foram as com melhores desempenhos acústicos.

Então, a chapa piloto, apenas com areia e cimento, não apresentaram resultados vantajosos em nenhuma frequência, quando comparadas com as chapas que possuem RPPO.

A Tabela 24 mostra os resultados acústicos através da diferença entre os decibéis gerados e recebido:

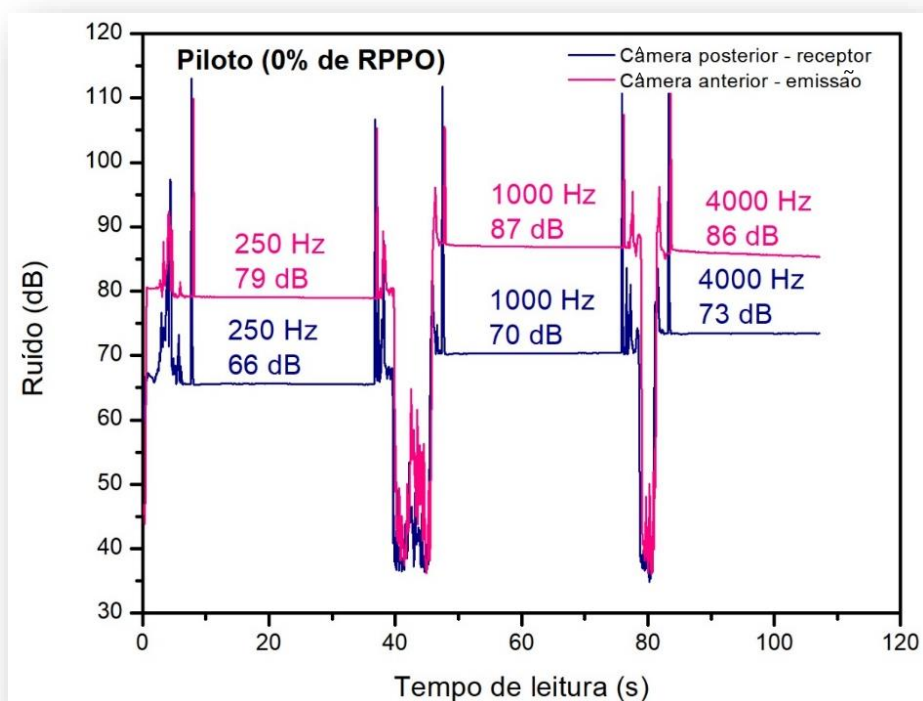
Tabela 24 – Resultados acústico.

Frequências:	250 Hz	1000 Hz	4000 Hz
Amostras:	Decibéis absorvidos pelas placas - atenuação (dB)		
Piloto 0% de RPPO	13	17	13
10% de RPPO	18	25	25
15% de RPPO	18	24	25
20% de RPPO	21	24	25

Fonte: próprio autor (2019).

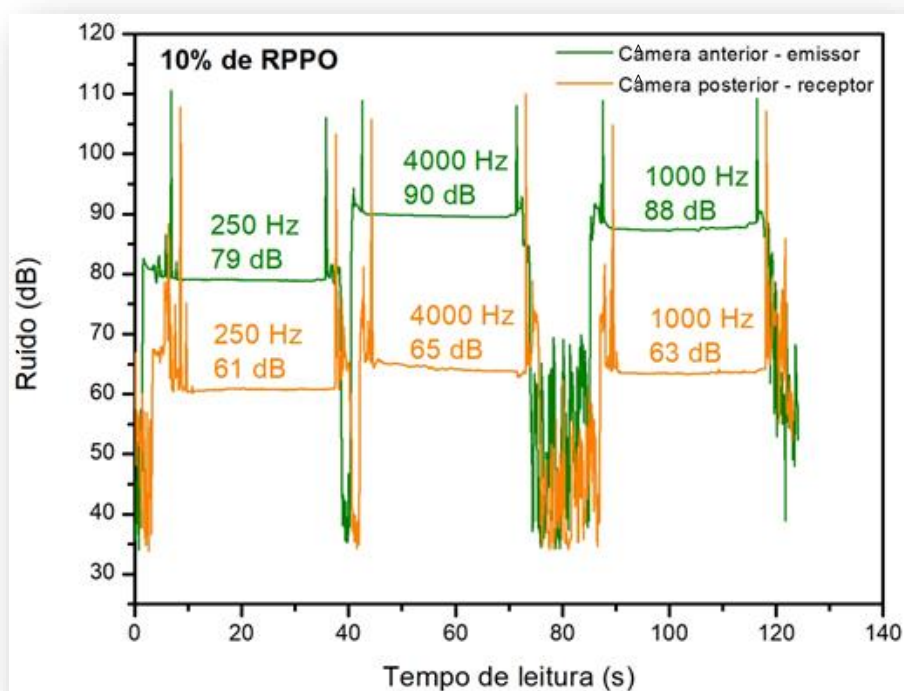
As Figuras 72 à 75 representam os gráficos com os resultados acústicos obtidos:

Figura 72 – Resultados acústicos das chapas piloto (0% de RPPO).



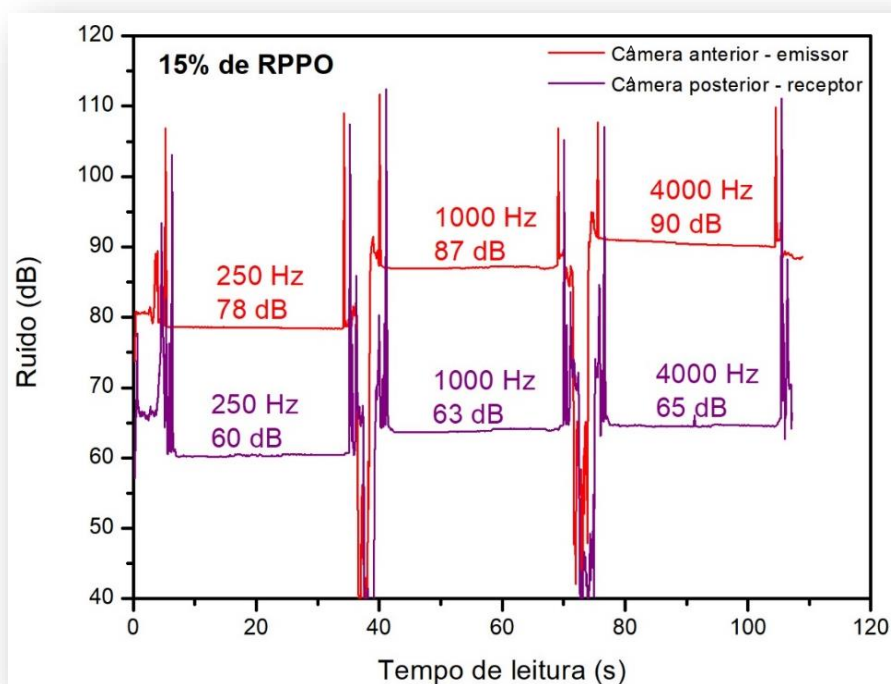
Fonte: próprio autor (2019).

Figura 73 – Resultados acústicos das chapas com 10% de RPPO.



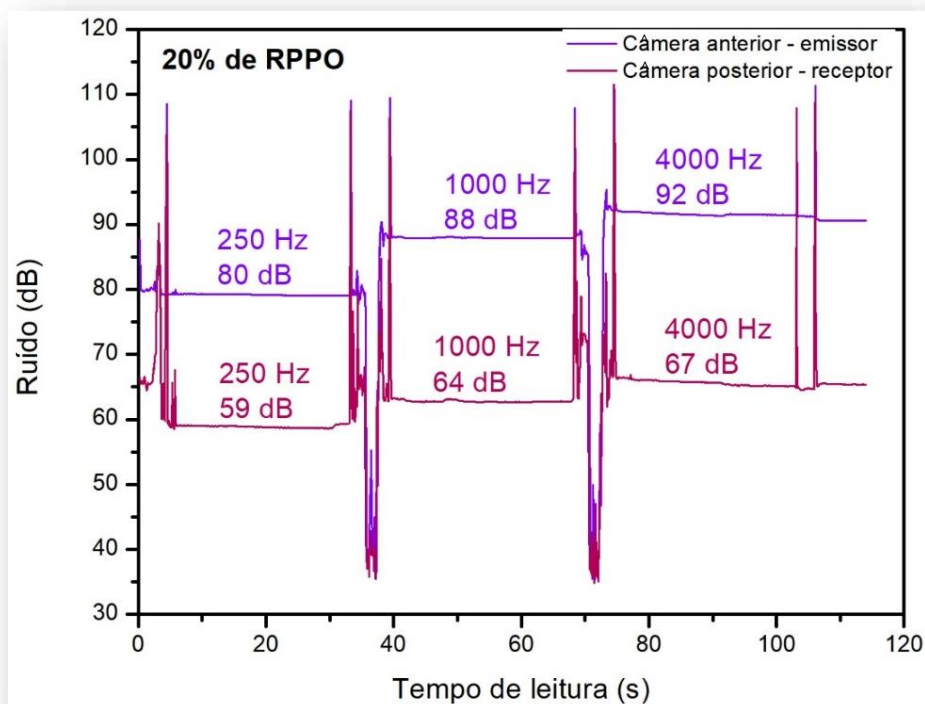
Fonte: próprio autor (2019).

Figura 74 – Resultados acústicos das chapas com 15% de RPPO.



Fonte: próprio autor (2019).

Figura 75 – Resultados acústicos das chapas com 20% de RPPO.



Fonte: próprio autor (2019).

A absorção sonora é a capacidade que o material tem de absorver o som gerado. Por outro lado, o isolamento sonoro é a capacidade do material de isolar o som, não absorver. Por exemplo, quando ondas sonoras são incididas em uma determinada superfície e não são refletidas, tem-se a absorção sonora, ou seja, a energia em parte foi absorvida pelo material. Já quando as ondas sonoras refletem ao ambiente em que foram geradas, tem-se o isolamento acústico, onde parte ou toda a energia gerada foi isolada pelo material, não sendo por ele absorvida [81].

A absorção sonora depende muito da espessura e da densidade do material. Fato observado no ensaio da chapa composta por 20% de RPPO, que se mostrou ter maior capacidade de isolamento acústico na maior frequência, ou seja, apresentou maior quantidade de finos, conforme visto no ensaio granulométrico, tornando a amostra mais compacta, além de densa, como pode-se enxergar no ensaio de densidade das chapas.

O RPPO cumpriu seu papel de enchimento, diminuindo a chance do som de atravessar a chapa. A capacidade de isolar o som se dá com maior intensidade nos materiais densos do que na presença de ar (o ar apenas ajuda a dissipar e não a isolar). Nas chapas pilotos, sem a incorporação de RPPO, por serem mais porosas, apresentaram menor capacidade de isolamento acústico, porém podem apresentar maior dissipação, fato explicado com base em sua densidade, que é menor.

As chapas com 10% de resíduo, foram as que mais se destacaram no comportamento acústico, em todas as frequências. Já as de 20% de RPPO, se destacaram na maior frequência, com 4000 Hz.

O estudo de isolamento acústico é muito importante hoje em dia nas edificações, graças à exigência atual de conforto ao ambiente.

Nas análises e pesquisas de Schiavi et al., o isolamento do som de impacto, e o isolamento de som da fachada, depende dos desempenhos das estruturas e componentes envolvidos e não depende diretamente das propriedades mecânicas [82]. Assim sendo, as chapas cimentícias fabricadas com a presença do resíduo de rochas ornamentais geram um maior isolamento acústico devido as propriedades do resíduo e sua composição, como por exemplo, o óxido de silício.

Atenuação sonora é muito importante para qualquer ambiente, onde a redução do som em estabelecimentos e residências, estão dentro da lei e, além disso, traz inúmeros benefícios. Já a frequência de som é o número de ciclos de uma onda sonora, por segundo. A frequência do som aumenta, na medida que o número de ciclos por segundo aumenta. A relação entre ambos constituintes acústicos se dá no aspecto que quanto menor for a frequência acústica (número de

ciclos por segundo), melhor será a atenuação sonora, em que os usuários serão beneficiados, com quantidade ideais de som. Então, no ensaio realizados por esta pesquisa, a frequência de 250 Hz é a mais adequada e indicada para ser utilizada, por apresentar menor atenuação sonora.

6 CONCLUSÃO

Com os resultados obtidos por meio dos ensaios propostos e realizados para as chapas, todas as análises apresentaram efeitos positivos e vantajosos para a utilização do resíduo do processamento de pedras ornamentais em parcelas de substituições da areia na argamassa.

As caracterizações dos materiais foram fundamentais para as análises dos resultados adquiridos. Em todos os ensaios realizados, as chapas com a incorporação do resíduo, apresentaram resultados vantajosos em relação à proporção piloto, com 0% de RPPO.

Com as pesquisas feitas, pode-se dizer que o RPPO é muito prejudicial para o meio ambiente e que uma forma de retirá-lo desse meio é fazendo seu uso na construção civil o que, conseqüentemente, diminui sua deposição em lugares inadequados, gerando benefícios para os fins aplicados.

O resíduo de marmoraria apresenta função de enchimento quando adicionado na massa, devido a sua granulometria, garantindo melhor aderência e coesão entre os agregados e aglomerante constituintes, característica evidente no MEV.

Nos ensaio de FRX e DRX, o RPPO apresentou uma composição química semelhante ao cimento CPV-ARI, o que justifica as suas funções vantajosas proporcionadas à argamassa, tanto na garantia de resistência quanto nos efeitos complementares ao cimento. Daí se dá a teoria que o RPPO não pode substituir o cimento, por não apresentar efeitos pozzolânicos, pode apenas ser acrescentado junto com esse aglomerante para potencializar as suas funções.

A densidade do resíduo foi a maior entre os constituintes das argamassas, proporcionando às chapas com 20% de RPPO, uma menor absorção de água, números de vazios e maior isolamento térmico.

As estruturas morfológicas dos agregados e aglomerante, foram essenciais para poder identificar cada um nas imagens geradas pelo ensaio de microscopia eletrônica de varredura, podendo assim dizer, que a areia é muito mais fácil de ser identificada devido à sua alta composição de quartzo, se caracterizando com formatos de minerais e cristais; o cimento por ser pulverulento apresenta estruturas mais indefinidas, formando uma espécie de aglomerados de pó, e o RPPO apresentou estruturas mais irregulares, compactas e densas, assumindo grão pontiagudos.

O acréscimo do resíduo nas chapas, tornou-as mais densas, assumindo massas específicas iguais em todas as proporções. A proporção de 10% do RPPO, foi indicada para os ensaios de permeabilidade e atenuação acústica. O ensaio mecânico de impacto, possibilitou resultados melhores com a presença de 15 e 20% de RPPO.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ABIROCHAS – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS. Brasília, 2018. Acesso em: 24 Jun. 2019.
- [2] MONTANI, Carlo. XXVIII Rapporto Marmo e Pietre nel Mondo 2018. Aldus: Carrara (IT), 2018. 263 p.
- [3] U.S. Environmental Protection Agency. Estados Unidos. 2017.
- [4] SILVA, Margarete Bernal de Lima e. Novos Materiais a Base de Resíduos De Construção e Demolição (RCD) e Resíduos de Produção de Cal (RPC) para o Uso na Construção Civil. Dissertação (Mestrado). Curitiba, 2014.
- [5] FERREIRA, Juliana Schneider. Interpretações econômicas dos acordos ambientais internacionais. 2017.
- [6] ALLEN, Cameron; METTERNICHT, Graciela; WIEDMANN, Thomas. National pathways to the Sustainable Development Goals (SDGs): A comparative review of scenario modelling tools. *Environmental science & policy*, v. 66, p. 199-207, 2016.
- [7] SILVA, J.B.; HOTZA, D.; SEGADÃES, AM; ACCHAR, W. Incorporação de lama de mármore e granito em massas argilosas. *Cerâmica*, v. 51, n. 320, p. 325-330, 2005.
- [8] MOREIRA, J. M. S.; FREIRE, M. N.; HOLANDA, J. N. F. Utilização de resíduo de serragem de granito proveniente do estado do Espírito Santo em cerâmica vermelha. *Cerâmica*, v. 49, n. 312, p. 262-267, 2003.
- [9] CORINALDESI, V.; MORICONI, G.; NAIK, T.R. Characterization of marble powder for its use in mortar and concrete. *Construction and building materials*, v. 24, n. 1, p. 113-117, 2010
- [10] VIDAL, F. W. H. Introdução. In: CARANASSIOS, A. A Tecnologia de Rochas Ornamentais: pesquisa, lavra e beneficiamento. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2013. p. 15-42.3
- [11] HAREELL, J.A.; P., STOREMYR. Ancient Egyptian. Na illustrated overview., Abu-Jaber, N., Bloxam, E.G., Degryse, P. and Heldal, T. (eds.), 2009. 7-50. Disponível em: <http://www.ngu.no/upload/Publikasjoner/Special%20publication/SP12_s7-50.pdf>. Acesso em: 26 ago. 2018. QuarryScapes: ancient stone quarry landscapes in the Eastern Mediterranean, Geological Survey of Norway.
- [12] LÓPES JIMENO, C. (. Manual de Rochas Ornamentais: Entorno Gráfico. Madrid, p. 696. 1995.
- [13] CUSTÓDIO, J. D. A. C. A arquitetura de defesa no Brasil Colonial, Londrina, v. 7, n. 10, p. 173-194, 01 Jan 2011. Disponível em: <www.uel.br/revistas/uel/index.php/discursosfotograficos/.7848>. Acesso em: 19 out. 2012.

-
- [14] FERNANDES, N. Introdução. In: CARANASSIOS, A. Tecnologia de Rochas Ornamentais: pesquisa, lavra e beneficiamento. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2013. p. 15-42.
- [15] E. Bacarji et al. / CONSTRUÇÃO E MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO 45. P. 1-10. 2013.
- [16] SIMPÓSIO TEMÁTICO - CONSERVAÇÃO E LEGISLAÇÃO AMBIENTAL. Anais eletrônicos, Goiás, 2017. Acesso em: 28 ago. 2018.
- [17] BRASIL. Constituição (1988). Constituição da República Federativa do Brasil. São Paulo, p. 168. 1988. (Série Legislação Brasileira).
- [18] SÁNCHEZ, L. E. Industry response to the challenge of sustainability: the case of Canadian nonferrous mining sector, Environmental Management. p. 521-531. 1998.
- [19] BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). Diretoria de Procedimentos Arrecadatórios (DIPAR). Brasília. 2018.
- [20] BRASIL. Instituto brasileiro de mineração (IBRAM). 2014.
- [21] AMBIENTE, CONSELHO NACIONAL DO MEIO. RESOLUÇÃO CONAMA Nº 20. 18 de junho de 1986.
- [22] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15012: Rochas para revestimento de edificações - Terminologia. Rio de Janeiro. 2013.
- [23] FRANGELLA, J. Usos, adequações e aplicações das rochas ornamentais e de revestimentos. In: Anais do IV Simpósio de Rochas Ornamentais do Nordeste, 16 a 19 de Novembro de 2003, Fortaleza. Rio de Janeiro. 2003.
- [24] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16697: Cimento Portland Branco. Rio de Janeiro. 2018.
- [25] HELENE, P. Concreto: Ciência e Tecnologia. 1. ed. São Paulo, 2001.
- [26] BAUER, F. L. A. Materiais de Construção. 5. ed., LCT, v. 1, 2005.
- [27] MASDAR INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY. "UAE desert sand can store solar energy up to 1000°C." ScienceDaily. ScienceDaily, 4 January 2016. <www.sciencedaily.com/releases/2016/01/160104164852.htm>.
- [28] BARBOSA, M.T.G.; COURA, C.V.G; MENDES, L.O. The artificial sand x natural sand for concrete production, Porto Alegre, v.8, n.4, p. 51-60, 2008.
- [29] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15498: Placa Plana Cimentícia sem Amianto. Rio de Janeiro. 2016.
- [30] FAZ FACIL – REFORMA E CONSTRUÇÃO. Disponível em: <<https://www.fazfacil.com.br/reforma-construcao/pisos/piso-concreto/pisos-cimenticios-garagem-externas>> Publicado em 2017. Acesso em: 26 Jun. 2019.

-
- [31] DRENALTEC – PISOS E REVESTIMENTOS. Disponível em: <<https://www.drenaltec.com.br/fabrica-placa-cimenticia/>>. Publicado em 2019. Acesso em: 26 Jun. 2019.
- [32] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15575: Normas de Desempenho – Parte 1 e 4. Rio de Janeiro. 2015.
- [33] Y. V. Póvoas Et al. – Influência da perda de água por evaporação na resistência de aderência entre argamassa colante e placa cerâmica. P 12. 2012.
- [34] I.Bekir Topçu et al. Effect of waste marble dust content as filler on properties of self-compacting concrete - Construction and Building Materials 23 (2009) 1947–1953.
- [35] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E1621-13: Standard Guide for Elemental Analysis by Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometry (Using Simple Beam With Center-Point Loading). EUA, p. 9. 2013.
- [36] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6481: Solo - Sondagens de simples reconhecimento com SPT - Método de ensaio. Rio de Janeiro. 2001.
- [37] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, p. 6. 2012.
- [38] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11579: Cimento Portland – Determinação da finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). Rio de Janeiro, p. 3. 2012.
- [39] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, p. 6. 2009.
- [40] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9776: Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. Rio de Janeiro, p. 3. 1987.
- [41] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro. p. 2. 2017.
- [42] CASTRO, L. A. S. D. Processamento de Amostras. Pelotas. 2002.
- [43] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 45: Agregados — Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, p. 8. 2006.
- [44] C. Zhang, A. Wang, M. Tang, X. Liu, The filling role of pozzolanic material, Cem. Concr. Res. 26, 6 (1996) 943- 947.
- [45] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 5738: Concreto — Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, p. 9. 2016.

-
- [46] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13276 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, p. 2. 2016.
- [47] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778: Argamassa e concreto endurecido – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, p. 4. 2009.
- [48] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E 514: Standard Test Method for Water Penetration and Leakage Through masonry. EUA, p. 5. 2014.
- [49] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15575-4: edificações habitacionais: desempenho: parte 4: requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas: SVVIE: terminologia e requisitos. 4. ed. Rio de Janeiro. p. 63. 2013.
- [50] NEIRA, Dorivalda Santos Medeiros. Fibras de sisal (Agave Sisalana) com o isolante térmico em tubulações. Dissertação. Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2005. 80f.
- [51] KREITH, F. Princípios da Transmissão de Calor. 9^a.ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 2008.
- [52] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15220 – Desempenho térmico de edificações - Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, p. 23. 2003.
- [53] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 10534: Acoustics – Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes – Part 2: Transfer-function method. Genebra, Suíça, p. 11. 1998.
- [54] DANA, J. D.; HURLBUT, C. S. Manual de Mineralogia, Ed. Livros Técnicos e Científicos SA, RJ, Brasil, 1978.
- [55] V. Corinaldesi et al. / Construction and Building Materials 24 (2010). p. 113-117.
- [56] E. Bacarji et al. / Construction and Building Materials 45 (2013). p. 1-10.
- [57] AEM Abd Elmoaty / Construction and Building Materials 47 (2013). p. 743-752.
- [58] Muhammad Junaid Munir, Syed Minhaj Saleem Kazmi, Yu-Fei Wu, Asad Hanif, Muhammad Umer Arif Khan, Thermally Efficient Fired Clay Bricks Incorporating Waste Marble Sludge: An Industrial-Scale Study, (2017), doi: 10.1016/j.jclepro.2017.11.060.
- [59] Kristulovic P, Kamenic N, Popovic K. A new approach in evaluation of filler effect in cement. Cem Concr Res (1994). p. 721-7.
- [60] O. Kelestemur et al. Performance evaluation of cement mortars containing marble dust and glass fiber exposed to high temperature by using Taguchi method - Construction and Building Materials 60 (2014) 17–24.

-
- [61] A.H. Awad et al. A study of some thermal and mechanical properties of HDPE blend with marble and granite dust. - Ain Shams Engineering Journal 10 (2019) 353–358.
- [62] Revista Brasileira de Saúde Ocupacional. Silicose em trabalhadores de quartzo da região de São Tomé das letras- Minas gerais: dados iniciais indicam um grave problema de saúde pública. Volume 36, nº 123. Jan/Jun, 2011.
- [63] Deepankar Kumar Ashish, Feasibility of waste marble powder in concrete as partial substitution of cement and sand amalgam for sustainable growth, Journal of Building Engineering, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2017.11.024>.
- [64] V.F. MELO et al. - R. Bras. Ci. Solo. p. 26:29-41, 2002.
- [65] Carneiro, A. M. P; Cincotto, M. A. Dosagem de argamassa através de curvas granulométricas. 1999. São Paulo. p. 18.
- [66] L.G. Li, Z.H. Huang, Y.P. Tan, A.K.H. Kwan, H.Y. Chen, Recycling of marble dust as paste replacement for improving strength, microstructure and eco-friendliness of mortar, (2018), doi: 10.1016/j.jclepro.2018.10.332.
- [67] J. Zhang, C. Gong, Z. Guo, M. Zhang, Engineered cementitious composite with characteristic of low drying shrinkage, Cem. Concr. Res. 39 (4) (2009) 303-312.
- [68] Binici Hanifi, Kaplan Hasan, Yilmaz Salih. Influence of marble and limestone dusts as additives on some mechanical properties of concrete. Sci res Essay 2007;2(9): 372-9.
- [69] Pera J, Thevenim G, Chabannet M. Design of a novel system allowing the selection of an adequate binder for solidification/stabilization of wastes. Cement Concrete Res 1997;27(10):533-1542.
- [70] Ramachandran VS. Thermal analysis of cement components hydrated in the presence of calcium carbonate. Thermochim Acta 1988;127:385-94.
- [71] N. Jain, M. Garg. Effect of Cr (VI) on the hydration behavior of marble dust blended cement: solidification, leachability and XRD analyses. - Construction and Building Materials 22 (2008) 1851–1856.
- [72] Bahar Demirel. The effect of the using waste marble dust as fine sand on the mechanical properties of the concrete. Int J Phys Sci 2010;5 (9): 1372-80.
- [73] I.Bekir Topçu et al. Effect of waste marble dust content as filler on properties of self-compacting concrete - Construction and Building Materials 23 (2009) 1947–1953.
- [74] Santos. N. R. G. Caracterização mecânica, térmica e acústica de um composto que utiliza rejeitos de mármore, granito e EPS para a fabricação de blocos para a Construção Civil. 2014. p. 161. Natal.
- [75] ASTM C616M-15, Standard Specification for Quartz-Based Dimension Stone, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.
- [76] C. A. Queiroz; A. B. Melo. CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS DA PEDRA RECONSTITUÍDA COM RESÍDUOS DA EXTRAÇÃO DE QUARTZO

PARA APLICAÇÃO EM REVESTIMENTO DE FACHADAS DE EDIFÍCIOS. REEC – Revista Eletrônica de Engenharia Civil - Vol.15, N.1; p. 136-150. 2019.

- [77] SOUZA, et al. Caracterização química e mineralógica de resíduos de quartzitos para utilização em revestimento cerâmico. 4º Fórum Internacional de Resíduos Sólidos. Porto Alegre, RS – 22 a 24 de Julho de 2013.
- [78] FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. Manual de conforto térmico. 6. ed. São Paulo: Nobel, 2001.
- [79] VAN DEVENTER, E. N.; Climatic and Other Design Data for Evaluating Heating and Cooling Requirements of Buildings. Pretoria, National Building Research Institute, (Research Report,c 300). 1971.
- [80] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15220-2 – Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro. p. 21. 2005.
- [81] Júnior, L.P – Arquiteto, mestre e doutor em acústica pela Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (FAU-USP). Redação AECweb/e-Construmarket. São Paulo.
- [82] A. Schiavi et al. Stone masonry building: Analysis of structural acoustic and energy performance within the seismic safety criteria - Construction and Building Materials 220 (2019) 29–42.