

**UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE - UNESC
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO,
INOVAÇÃO E EXTENSÃO - PROPIEX
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS - PPGCEM
MESTRADO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS**

KARINE WEBER MEURER

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO E
MECÂNICO DE PAVERS COM ADIÇÕES DE RESÍDUOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Junca
Coorientador: Prof^o. Dr. Elídio Angioletto

**CRICIÚMA
2023**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

M598a Meurer, Karine Weber.

Avaliação do comportamento térmico e mecânico de pavers com adições de resíduos / Karine Weber Meurer. - 2022.

131 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Criciúma, 2022.

Orientação: Eduardo Junca.

Coorientação: Elidio Angioletto.

1. Pavers de concreto. 2. Pavers de concreto - Propriedades térmicas. 3. Pavers de concreto - Propriedades mecânicas. 4. Concreto - Aditivos. 5. Resíduos de vidro - Reaproveitamento. 6. Pedra São Tomé. I. Título.

CDD 23. ed. 620.136

Bibliotecária Eliziane de Lucca Alosilla - CRB 14/1101
Biblioteca Central Prof. Eurico Back - UNESC

Karine Weber Meurer

Avaliação do comportamento térmico e mecânico de pavers com adições de resíduos.

Esta Dissertação foi julgada adequada à obtenção do grau de Mestre(a) em Ciência e Engenharia de Materiais pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais - PPGCEM (Área de concentração: Tecnologia de Materiais) da Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC.

Criciúma, SC, 09 de fevereiro de 2023.

Banca Examinadora:



Prof. Dr. Fabiano Raupp Pereira

Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC



Prof. Dr. Adriano Michael Bernardin

Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC



Profª Drª Glaucea Warmeling Duarte

Centro Universitário Barriga-Verde - UNIBAVE

Ao meu esposo e minha família, por
todo o incentivo e apoio constante.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por ter me dado sabedoria para o desenvolvimento deste trabalho e por não permitir que eu desistisse nos momentos de dificuldades.

Ao meu marido Marciel Schmoeller Heidemann, por sempre estar ao meu lado, me dando força e incentivando.

Aos meus pais, Estélio Schilickmann Meurer e Zélia Weber Meurer, por não medir esforços em me ajudar.

Ao colega e professor Júlio Preve Machado, pela indicação, incentivo e auxílio sempre.

Ao meu orientador Eduardo Junca, e coorientador, Elidio Angioletto, por todo o auxílio prestado no desenvolvimento da pesquisa.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais - PPGCEM/UNESC, pelos conhecimentos compartilhados, e à Vivian, secretária do PPGCEM, pelos esclarecimentos acerca do regimento do Programa.

Ao Instituto de Engenharia e Tecnologia IDT/UNESC e a toda a sua equipe de profissionais e pesquisadores que colaboraram com os ensaios desta pesquisa.

Aos colegas de pós-graduação, por toda a amizade, convivência e trabalhos desenvolvidos em grupo.

Ao Programa UNIEDU/FUNDES pós-graduação, pelo auxílio financeiro.

À UNESC, por disponibilizar a sua estrutura, permitindo a elaboração desta dissertação de mestrado.

À CAPES.

“Ninguém é tão grande que não possa aprender, nem tão pequeno que não possa ensinar.”

Esopo

RESUMO

O desenvolvimento de novos materiais e tecnologias empregados nas construções busca constantemente melhorias, bem como potencializar novas matérias primas para a confecção de produtos já tradicionalmente utilizados. Dentre todos os sistemas construtivos, a pavimentação é uma área que ainda precisa de maior entendimento. Desta forma, o objetivo desse trabalho foi determinar a aplicação do resíduo de vidro e da pedra São Tomé na confecção de pavers, verificando os comportamentos mecânicos e térmicos que estes materiais proporcionam ao paver. Além disso, visa-se identificar as aplicações deste produto como materiais frios para reduzir o efeito de temperatura superficial, diminuindo o fluxo de calor sensível nas cidades. Para isso, os resíduos foram caracterizados por análises químicas, difrações de raios X e FTIR. Em seguida, eles foram cominuídos para serem adicionados nos pavers. As misturas para confecção dos pavers seguiu uma programação experimental 2^2+2 , em que os teores de resíduo de vidro e pedra São Tomé variaram de 0 a 30%, em massa. Na sequência, foram realizados os ensaios mecânicos de resistência à compressão e ensaios térmicos de absorção de calor. Os resultados mostraram que a substituição da dosagem de agregados miúdos por resíduo de vidro e de pedra São Tomé em relação ao paver de referência atingiu uma resistência mecânica de aproximadamente 85% e 73% respectivamente. Além disso, o paver com substituição de 30% de resíduo de vidro obteve uma redução de 5,5% na temperatura máxima e relação ao paver referência.

Palavras-chave: Pavers. Materiais Frios. Resíduo de vidro. Pedra São Tomé.

ABSTRACT

The development of new materials and technologies used in construction constantly seeks improvements, as well as to leverage new raw materials for the manufacture of products used traditionally. Among all building systems, paving is an area that still needs more understanding. Thus, the aim of this work was to determine the application of glass waste and São Tomé stone in the manufacture of pavers, verifying the mechanical and thermal behavior that these wastes provide to the paver. In addition, it aims to identify the applications of this product as cold materials to reduce the effect of surface temperature, reducing the flow of sensible heat in cities. For this, the wastes were characterized by chemical analysis, x-ray diffraction and FTIR. Then, they were milled to be added into the pavers. The pavers were produced through a 2²+2 experimental program, in which the levels of glass and São Tomé stone residue varied from 0 to 30%, by weight. Then, it was performed the mechanical compressive strength and thermal heat absorption tests. The results showed that the replacement of the dosage of fine aggregates by waste glass and São Tomé stone in relation to the reference paver reached a mechanical resistance of approximately 85% and 73% respectively. In addition, the paver with 30% replacement of glass waste obtained a 5.5% reduction in the maximum temperature .

Keywords: Pavers. Cold Materials. Glass residue. São Tomé stone.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema simplificado do sistema de transferência de calor em pavimentos asfálticos e corpo humano.	33
Figura 2 - Estrutura de assentamento do pavimento intertravado.	34
Figura 3 - Vidro de para-brisa com indicações de seus materiais.	37
Figura 4 - Representação esquemática do estudo de qualificação de resíduos como materiais alternativos de engenharia.	39
Figura 5 - Fluxograma representativo das principais etapas do procedimento experimental.	41
Figura 6 - Para-brisa estocado no local em que foram coletados.	42
Figura 7 - Resíduos de pedra São Tomé coletados em marmoraria localizada em Criciúma – SC.	42
Figura 8 - (A) Resíduo de vidro cortado em tamanhos menores. (B) Moagem do resíduo de vidro no moinho martelo.	43
Figura 9 - (A) Redução do tamanho da Pedra São Tomé com auxílio de uma marreta. (B) Moagem da Pedra São Tomé em um moinho martelo. ..	44
Figura 10 - Fluxograma representativo dos ensaios de caracterização dos materiais.	44
Figura 11 - Quarteamento e homogeneização da amostra. (A) Areia fina. (B) Pó de pedra.	46
Figura 12 - Corpo de prova de paver na prensa hidráulica, durante a realização do ensaio de compressão.	52
Figura 13 - Corpos de provas de pavers sob iluminação artificial, durante a realização do ensaio de absorção de calor.....	55
Figura 14 - Esquema representativo do painel utilizado no meio interno para aquecer os pavers e realizar as medições de temperaturas com auxílio dos data-loggers.	55
Figura 15- Corpos de provas de pavers sob iluminação solar natural, durante a realização do ensaio de absorção de calor.	56
Figura 16 - Difratoograma obtido do resíduo de pedra São Tomé.	58
Figura 17 - Termogravimetria (TG) do resíduo de pedra São Tomé moída.	59
Figura 18 - FTIR da amostra de resíduo de pedra São Tomé moída.	60
Figura 19 - Distribuição dos tamanhos granulométricos dos resíduos de pedra São Tomé e limites estabelecidos pela norma.	62
Figura 20 - Difratoograma obtido do resíduo de vidro.....	63
Figura 21 - FTIR da amostra de resíduo de vidro moído.....	64
Figura 22 - Distribuição dos tamanhos granulométricos do resíduo de vidro e limites estabelecidos pela norma.	66
Figura 23 - Difratoograma do cimento CP V ARI RS.	67
Figura 24 - Distribuição dos tamanhos granulométricos da areia fina e limites estabelecidos pela norma.	69

Figura 25 - Distribuição dos tamanhos granulométricos do pó de pedra e limites estabelecidos pela norma.....	71
Figura 26 - Superfície dos pavers para as diferentes composições.	73
Figura 27 - Difratoograma obtido dos pavers P Ref; P V0,PST30; P V30,PST0; P V30,PST30; P V15,PST15; P V15,PST15.	74
Figura 28 - Termogravimetria (TG) do resíduo dos pavers moído.	75
Figura 29 - FTIR da amostra de pavers moídos.....	76
Figura 30 - Absorção de água e Índice de vazios (Iv) das diferentes composições de pavers.	78
Figura 31 - Gráfico de Pareto dos fatores Resíduo de vidro, Resíduo de pedra São Tomé e 1 by 2 (Resíduo de vidro com Resíduo de pedra São Tomé) para a absorção de água após os 50 dias.	80
Figura 32 - Gráfico de Superfície de resposta dos fatores Resíduo de vidro, Resíduo de pedra São Tomé e 1 by 2 (Resíduo de vidro com Resíduo de pedra São Tomé) para a absorção de água após os 50 dias.	80
Figura 33 - Gráfico de Pareto dos fatores Resíduo de vidro, Resíduo de pedra São Tomé e 1 by 2 (Resíduo de vidro com Resíduo de pedra São Tomé) para o índice de vazios após os 50 dias.	82
Figura 34 - Gráfico de valores médios de índice de vazios do paver P Ref e do P V0,PST30.	83
Figura 35 - Gráfico de Pareto dos fatores Resíduo de vidro, Resíduo de pedra São Tomé e 1 by 2 (Resíduo de vidro com Resíduo de pedra São Tomé) para massa específica aparente seca após os 50 dias.	85
Figura 36 - Gráfico de valores médios da massa específica aparente seca dos pavers P Ref e P V0,PST30.....	86
Figura 37 - Resistência à compressão das amostras de pavers aos 7, 21 e 28 dias.....	89
Figura 38 - Gráfico de Pareto dos fatores Resíduo de vidro, Resíduo de pedra São Tomé e 1 by 2 (Resíduo de vidro com Resíduo de pedra São Tomé) para a resistência à compressão após os 7 dias.	90
Figura 39 - Gráfico de resistências médias à compressão dos pavers P Ref e P V0,PST30 aos 7 dias.	91
Figura 40 - Gráfico de Pareto dos fatores Resíduo de vidro, Resíduo de pedra São Tomé e 1 by 2 (Resíduo de vidro com Resíduo de pedra São Tomé) para a resistência à compressão após os 21 dias.	93
Figura 41 - Gráfico de Superfície de resposta dos fatores Resíduo de vidro, Resíduo de pedra São Tomé e 1 by 2 (Resíduo de vidro com Resíduo de pedra São Tomé) para a resistência à compressão após os 21 dias.	94
Figura 42 - Gráfico de Pareto dos fatores Resíduo de vidro, Resíduo de pedra São Tomé e 1 by 2 (Resíduo de vidro com Resíduo de pedra São Tomé) para a resistência à compressão após os 28 dias.	96
Figura 43 - Gráfico de resistências médias à compressão dos pavers P Ref e P V0,PST30 aos 28 dias.	97

Figura 44 – Representação térmica dos pavers submetidos à radiação de luz artificial.	98
Figura 45 - Imagem termográfica de pavers submetidos à radiação artificial.	99
Figura 46 - Representação térmica dos pavers submetidos à radiação de luz solar.	100
Figura 47 - Imagem termográfica de pavers submetidos à radiação solar.	100
Figura 48 - Gráfico de Pareto dos fatores Resíduo de vidro, Resíduo de pedra São Tomé e 1 by 2 (Resíduo de vidro com Resíduo de pedra São Tomé) para a absorção de calor nos pavers sob luz artificial.	102
Figura 49 - Gráfico de médias de absorção de calor submetido à radiação artificial nos pavers sem resíduos (P Ref) e com 30% de resíduo de vidro (P V30,PST0).	102
Figura 50 - Gráfico de Pareto dos fatores Resíduo de vidro, Resíduo de pedra São Tomé e 1 by 2 (Resíduo de vidro com Resíduo de pedra São Tomé) para a absorção de calor nos pavers sob luz solar.	104
Figura 51 - Gráfico de médias de absorção de calor submetidos à radiação solar dos pavers sem resíduos (P Ref) e com 30% de resíduo de vidro (P V30,PST0).	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Conjunto de peneiras das séries normal e intermediária (abertura nominal).....	46
Tabela 2 - Quantidade de resíduo de vidro e de pedra São Tomé substituído no pó de pedra na mistura dos concretos para confecção dos pavers..	49
Tabela 3 - Tipos de pavers produzidos, com seus materiais constituintes e quantidades para a produção do volume de concreto necessário para os ensaios.	49
Tabela 4 - fator multiplicativo p.	53
Tabela 5 - Coeficiente de Student (nível de confiança de 80 %)	54
Tabela 6 - Análise química do resíduo de pedra São Tomé moída.	57
Tabela 7 - Distribuição da composição granulométrica do resíduo de pedra São Tomé.....	61
Tabela 8 - Análise química do resíduo de vidro moído.	63
Tabela 9 - Distribuição da composição granulométrica do resíduo de vidro.	65
Tabela 10 - Análise química do cimento CP V - ARI RS utilizado na confecção dos pavers.....	67
Tabela 11- Distribuição da composição granulométrica da areia fina.....	68
Tabela 12 - Distribuição da composição granulométrica do pó de pedra. ..	70
Tabela 13 - Distribuição da composição granulométrica da brita nº 0.	72
Tabela 14 - Absorção de água (A), Índice de vazios (Iv) e Massa específica aparente seca (ρ_s) das diferentes composições.	77
Tabela 15 - Resultados do método ANOVA para o módulo da absorção de água após 50 dias.	79
Tabela 16 - Análise estatística dos resultados de índice de vazios.....	81
Tabela 17 - Análise estatística dos resultados de massa específica aparente seca.....	84
Tabela 18 - Resistência à compressão dos pavers nos períodos de 7, 21 e 28 dias.	87
Tabela 19 - Porcentagens média de resistência à compressão alcançadas relacionando os pavers de 7 dias com os pavers de 28 dias, e o paver Ref com os demais.....	88
Tabela 20 - Resultados do método ANOVA para a resistência à compressão aos 7 dias.	90
Tabela 21 - Resultados do método ANOVA para a resistência a compressão aos 21 dias.	92
Tabela 22 - Resultados do método ANOVA para a resistência à compressão aos 28 dias.	95
Tabela 23 - Média das temperaturas dos pavers submetidos à radiação artificial.	98

Tabela 24 - Média das temperaturas dos pavers submetidos à radiação solar.	99
Tabela 25- Resultados do método ANOVA para a absorção de calor dos pavers sob luz artificial.....	101
Tabela 26 - Resultados do método ANOVA para a absorção de calor dos pavers sob luz solar.	103

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A/C	Água/Cimento
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CeCaM II	Central de Caracterização de Materiais II
DRX	Difração de Raios X
DTA	Análise Térmica Diferencial
FTIR	Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier
IDT	Instituto de Engenharia e Tecnologia
IPARQUE	Parque Científico e Tecnológico
LAREX	Laboratório de Reciclagem Tratamento de Resíduos e Extração
LMCC	Laboratório de Materiais de Construção Civil
MPa	Mega Pascal
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma Mercosur
PVB	Polivinilbutiral
SC	Santa Catarina
TG	Termogravimetria
UNESC	Universidade do Extremo Sul Catarinense
WDXRF	Dispersão de Comprimento de Onda

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	25
2 OBJETIVOS	27
2.1 OBJETIVO GERAL	27
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	27
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	29
3.1 ILHA DE CALOR URBANA.....	29
3.2 RADIAÇÃO SOLAR.....	30
3.3 REFLETÂNCIA.....	30
3.4 EMITÂNCIA/EMISSIVIDADE	31
3.5 TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	32
3.6 PAVIMENTO INTERTRAVADO	34
3.7 RESÍDUO DE VIDRO.....	35
3.7.1 Aplicação do vidro	36
3.7.2 Vidro de para-brisas	37
3.8 PEDRA SÃO TOMÉ.....	38
3.9 VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS	38
4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	41
4.1 OBTENÇÃO DOS MATERIAIS.....	41
4.2 PREPARAÇÃO DOS MATERIAIS	43
4.2.1 Moagem do resíduo de vidro	43
4.2.2 Moagem do resíduo de pedra São Tomé	43
4.3 CARACTERIZAÇÕES DOS MATERIAIS	44
4.3.1 Distribuição granulométrica	45
4.3.2 Termogravimetria (TG)	47
4.3.3 Difração de Raios X (DRX)	47
4.3.4 Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)	48
4.4 MISTURA DOS EXPERIMENTOS.....	48
4.4.1 Dosagem dos pavers	48
4.5 MISTURA E MOLDAGEM DOS PAVERS	50
4.6 ENSAIOS DOS PAVERS NO ESTADO ENDURECIDO.....	50
4.6.1 Ensaio de absorção de água	50
4.6.2 Ensaio de índice de vazios	51
4.6.3 Ensaio de massa específica aparente seca	51
4.6.4 Ensaio de compressão	52
4.6.5 Ensaio Térmicos	54
4.7 TRATAMENTO ESTATÍSTICO	56
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	57

5.1.1 Caracterização da Pedra São Tomé	57
5.1.1.1 Análise química.....	57
5.1.1.2 Difração de Raios X	58
5.1.1.3 Termogravimetria.....	59
5.1.1.4 Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier.....	59
5.1.1.5 Análise granulométrica	60
5.1.2 Caracterização do resíduo de vidro	62
5.1.2.1 Análise química.....	62
5.1.2.2 Difração de Raios X	63
5.1.2.3 Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier.....	64
5.1.2.4 Análise granulométrica	64
5.1.3 Caracterização do cimento	66
5.1.3.1 Análise química.....	66
5.1.3.2 Difração de Raios X	67
5.1.4 Caracterização dos agregados.....	68
5.1.4.1 Caracterização dos agregados miúdos.....	68
5.1.4.2 Caracterização dos agregados graúdos	71
5.2 ENSAIOS DOS PAVERS NO ESTADO ENDURECIDO	73
5.2.1 Caracterização dos pavers produzidos.....	73
5.2.1.1 Difração de Raios X	73
5.2.1.2 Termogravimetria.....	74
5.2.1.3 Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier.....	75
5.3.1 Absorção de água, índice de vazios e massa específica aparente seca dos concretos.....	76
5.3.1.1 Análise estatística dos resultados de absorção de água	79
5.3.1.2 Análise estatística dos resultados de índice de vazios	81
5.3.1.3 Análise estatística dos resultados de massa específica aparente seca ANOVA.....	83
5.4.1 Resistência à compressão dos pavers.....	86
5.4.1.1 Análise estatística dos resultados da resistência à compressão aos 7 dias.....	89
5.4.1.2 Análise estatística dos resultados da resistência à compressão aos 21 dias.....	92
5.4.1.3 Análise estatística dos resultados da resistência à compressão aos 28 dias.....	95
5.5.1 Desempenho térmico dos pavers.....	97
5.5.1.1 Desempenho térmico dos pavers submetidos à luz artificial.....	97
5.5.1.2 Desempenho térmico dos pavers submetidos à luz solar	99
5.5.1.3 Análise estatística dos resultados de absorção de calor dos pavers sob luz artificial	101

5.5.1.4 Análise estatística dos resultados de absorção de calor dos pavers sob luz solar.....	103
6 CONCLUSÃO	107
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	109
REFERÊNCIAS	111
APÊNDICES.....	120
APÊNDICE A - TABELA DE ABSORÇÃO DE ÁGUA DAS AMOSTRAS.....	121
APÊNDICE B - TABELA DE ÍNDICE DE VAZIOS DAS AMOSTRAS.....	122
APÊNDICE C - TABELA DE MASSA ESPECÍFICA DAS AMOSTRAS.....	123
APÊNDICE D - TABELA DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 7 DIAS DAS AMOSTRAS.....	124
APÊNDICE E - TABELA DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 21 DIAS DAS AMOSTRAS.....	126
APÊNDICE F - TABELA DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 28 DIAS DAS AMOSTRAS.....	128

1 INTRODUÇÃO

Com a expansão urbana, parte do solo permeável é substituído por construções e pavimentações, reduzindo os efeitos de resfriamento provido pelas vegetações. Tal fato acarreta em um aumento de temperatura, conhecida como ilhas de calor urbana (AMORIM et al., 2021).

O efeito conhecido como ilha de calor se dá pela elevação da temperatura em determinadas áreas urbanas. Esse aumento de temperatura está associado às alterações na radiação e nas propriedades térmicas, desencadeadas pelas variadas atividades urbanas. O calor da radiação solar pode ser afetado em determinadas áreas de acordo com a estrutura da cidade. Enfatiza-se que as cidades ocupam 2% da superfície da Terra, e seus habitantes consomem 75% dos recursos energéticos do mundo. Sendo assim, algumas estratégias são capazes de amenizar esses efeitos de ilhas de calor, como a inclusão de vegetação, o tipo de superfícies de pavimento, o albedo e tipos de materiais utilizados em construções (GAGO, 2013).

Diante disso, a modificação térmica no ambiente urbano altera o balanço energético, gerando problemas socioeconômicos e aumentando o consumo de energia (KIM; BROWN, 2021). Nas últimas décadas, nota-se uma preocupação com o meio ambiente ao todo e também em relação à produção de novos materiais. Desse modo, busca-se cada vez mais medidas de sustentabilidade no meio econômico, social e ambiental, por meio de medidas alternativas. Como exemplo pode-se apontar a avaliação da substituição parcial dos agregados em concretos bem como o reaproveitamento de resíduos (ORTEGA, 2014).

Nesse sentido, é notável o crescente uso de materiais de vidro no dia a dia. Ainda que este seja um material 100% reciclável, a taxa mundial de reciclagem de resíduo de vidro é baixa. Apenas 21% da quantidade total de vidro produzido no mundo é reciclado e o restante é destinado para aterros sanitários (HARDER, 2018). Por isso, utilizar os resíduos de vidro em obras de concretos, asfaltos, blocos de alvenarias, impulsiona progressivamente trabalhos sobre este tema, uma vez que possibilita um reaproveitamento e valorização do resíduo de vidro, além de diminuir a presença deste em aterros melhorando as questões ambientais (BALAN; ANUPAM; SHARMA, 2021).

No contexto de melhora no conforto térmico, o resíduo de vidro pode ser um bom aliado quando utilizado em pavimentos (GUO et al., 2020). Além do resíduo de vidro, de acordo com Queiroz e Melo (2018),

a pedra São Tomé possui características interessantes para melhorar a qualidade térmica de ambientes, visto que quando utilizada como revestimento, ela pode contribuir para boas condições de climatização, e por consequência um baixo consumo energético com aparelhos de ar-condicionado. Além do mais, se for mantida a característica térmica do material, podem ser aproveitados os resíduos gerados na sua extração, para a elaboração de novos materiais com o objetivo de utilizá-los em pavimentos.

Portanto, o objetivo dessa pesquisa é avaliar o comportamento térmico em pavimentações urbanas, como os pavers, substituindo a matéria prima (pó de pedra) por resíduos de vidro e resíduos de pedra São Tomé. Avaliou-se ainda o comportamento mecânico, absorção de água e índice de vazios . Por consequência, com o uso dos resíduos, diminui-se a quantidade de insumos e reduz-se o efeito de ilhas de calor urbana trazendo efeitos benéficos para o meio ambiente.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar as propriedades térmicas e mecânicas de pavers com o uso de resíduo de vidro e da pedra São Tomé como agregado miúdo visando estudar a potencialidade para aplicações em pavimentos frios.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar o potencial do resíduo de vidro e de pedra São Tomé para aplicação em pavers;
- Verificar o comportamento mecânico dos pavers devido à substituição do agregado miúdo por resíduo de vidro e da pedra São Tomé;
- Avaliar a utilização de resíduo de vidro e da pedra São Tomé na propriedade térmica de absorção de calor nos pavers.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Com o crescimento populacional e econômico, os centros urbanos passaram por alterações em sua superfície e atmosfera. Essas alterações modificaram também a fração do solo permeável, e conseqüentemente ocorre a redução da cobertura vegetal e da transpiração, aumentando a absorção da radiação solar. Como resultado aumenta o calor perceptível no ambiente urbano em comparação aos meios rurais (TIAN et al., 2021). Essa intervenção humana na superfície natural por meio da urbanização, armazenam o calor e resulta em ilha de calor urbana (BALAN; ANUPAM; SHARMA, 2021).

3.1 ILHA DE CALOR URBANA

A ilha de calor urbana é influenciada por diversos motivos, como o espaço de áreas construídas, o material utilizado e a distribuição espacial. Deve-se considerar ainda, a alta concentração de asfalto, ruas e avenidas de concreto, além dos prédios, casas e construções. É influenciada também pelo estilo de vida da sociedade, os meios de transporte, como veículo particular, público ou de bicicleta. Os fatores apresentados interferem na qualidade de vida, pois as altas temperaturas geram desconforto físico, além de que devido ao aumento de temperatura uma maior quantidade de ar quente sobe causando um desequilíbrio que resulta em fortes chuvas ocasionando possíveis enchentes (ROSHANA; SARLI; GRAB, 2021).

A morfologia urbana é alterada conforme as características físicas e as disposições dos edifícios, que influenciam o microclima urbano de diversas formas. Exemplo disso, a densidade dos edifícios diminui a velocidade média do vento ocasionando uma piora da ventilação urbana intensificando o efeito de ilha de calor urbana (JOSHUI et al, 2022).

Outro ponto a ser observado é que a ilha de calor urbana é um impasse na sustentabilidade. Como forma de conter as temperaturas elevadas para amenizar o desconforto humano, a utilização de ar condicionado é intensa, exigindo um consumo energético maior, aumentando o pico de demanda de eletricidade, e acentuando os problemas de poluição (SANTAMOURIS, 2011; CRUZ, 2021).

De acordo com Castro (2015), deve-se analisar e elaborar técnicas que reduzam o aquecimento gerado pela ilha de calor urbana, produzindo novos materiais, tecnologias e sistemas construtivos para os constituintes do espaço urbano. A pavimentação é um desses elementos a serem

estudados. A aplicação de pavimentos conhecidos como “frios” se torna um recurso importante para reduzir o efeito de fluxo de calor sensível nas cidades. Para isso, são analisados diferentes parâmetros térmicos, incluindo a difusividade e emissividade térmica, densidade, capacidade de armazenamento de calor, condutividade térmica, refletância solar e albedo (SHAMSAEI, CARTER, VAILLANCOURT; 2022).

Dentre os parâmetros citados, destaca que o uso do ar condicionado em temperatura igual a 25°C temos uma sensação térmica diferente em comparação a sua utilização de 22°C. Por mais que seja uma redução de 3°C proporciona um conforto térmico diferente e melhor. Realizando essa mesma comparação nos centros urbanos, que possuem uma sensação térmica de 38°C reduzir para 35°C estará proporcionando uma melhor qualidade de vida e uma redução no efeito de ilha de calor urbana. Desta forma, é considerado um pavimento frio, quando possuir uma redução da temperatura na superfície.

3.2 RADIAÇÃO SOLAR

O fenômeno da ilha de calor está associado à alta densidade de edifícios e da estrutura da cidade como já citado. O aquecimento da terra provém pela incidência da radiação solar, que após passar pela atmosfera atinge superfícies que absorvem essa radiação (CASTRO, 2015). No entanto, os materiais utilizados nas cidades desempenham um papel significativo no equilíbrio térmico urbano. Isso ocorre porque os materiais absorvem a radiação solar e infravermelha, dissipando parte do calor acumulado por meio de processos convectivos e radiativos para a atmosfera, intensificando a temperatura ambiente (SANTAMOURIS, 2011).

Ainda que a atmosfera seja transparente, apenas 25% da radiação solar incidente atravessam de modo direto para a superfície da Terra sem nenhuma interferência da atmosfera. O restante é refletido, absorvido ou espalhado novamente para o espaço. A Terra obtém energia por meio da radiação solar e perde por meio da radiação infravermelha em forma de ondas longas, para o espaço. Essa troca de energia determina a temperatura da Terra (CEBALLOS, 2000).

3.3 REFLETÂNCIA

A refletância é uma propriedade da física que ajuda compreender o comportamento térmico dos materiais. É conhecido que a intensidade

da radiação solar se altera conforme o intervalo de comprimento de onda na qual se encontra (CASTRO, 2015).

A refletância é caracterizada pela porcentagem da refletância solar. Os valores menores estão relacionados a cores mais escuras, e assim, as cores mais claras possuem um índice maior (SHAMSAEI, CARTER, VAILLANCOURT; 2022). Desta forma, na indústria da construção, é possível criar materiais com características melhoradas, inclusive nas propriedades térmicas. Assim quando utilizados em pavimentos ou edifícios podem aumentar a refletância. Essa propriedade pode de certa forma ser controlada, sendo portanto, útil para reduzir o aquecimento do edifício, beneficiando na redução de ilha de calor em centros urbanos (DANTAS, VITTORINO, LOH; 2022).

Diversos fatores, além da cor, interferem na refletância dos materiais. Entre esses fatores pode-se citar se o ambiente onde o material está exposto possui sombra, se a superfície é lisa ou rugosa, o clima ambiente e a radiação solar (CASTRO 2015).

Os materiais de construção civil geralmente possuem as superfícies rugosas, mas é consenso de que os materiais lisos possuem uma refletância superficial maior comparada aos materiais rugosos e isso ocorre devido às partículas de ar se concentrarem nessas irregularidades (AKBARI et al., 1997; DORNELLES E RORIZ, 2007).

3.4 EMITÂNCIA/EMISSIVIDADE

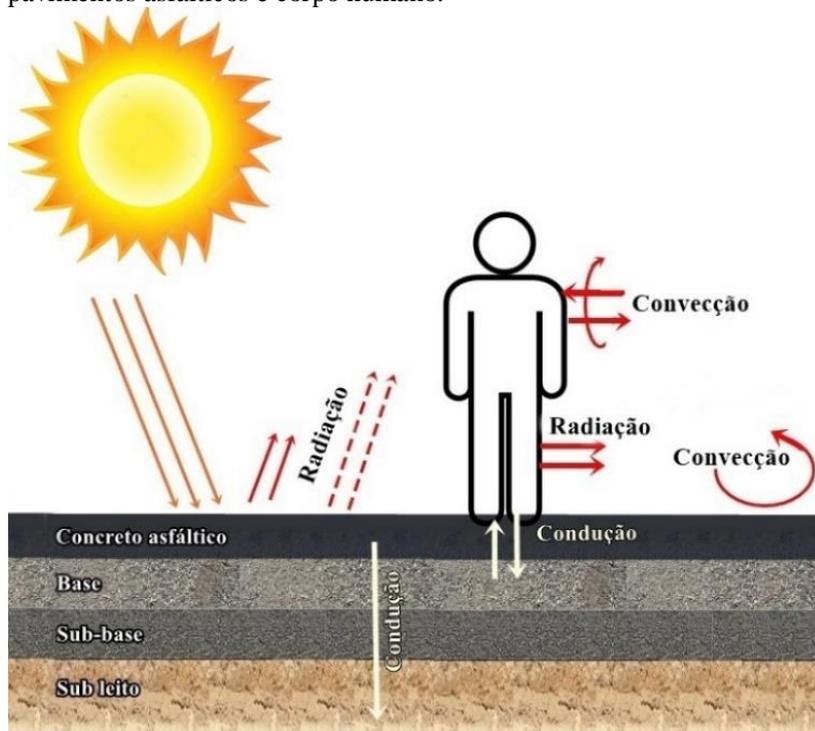
A emissividade espectral infravermelha possui um papel essencial em aplicações térmicas. Abrange a termometria de radiação, a conversão de energia e medições precisas de emissividade infravermelha (ZHANG, 2020).

A emitância espectral é definida como a razão entre a radiação de uma superfície e a de um corpo negro ambas em mesma temperatura. A emitância é uma função do comprimento de onda, temperatura e ângulo de emissão do sólido. Ela depende de diversos fatores como a composição química do material, a possível presença de fases secundárias e das características, como rugosidade e porosidade da superfície do material e a energia infravermelha pode ser aumentada pelo aquecimento. Com relação à medição de emissividade, podem ser usados tanto termopares quanto câmeras infravermelhas (AZZALI, 2021; SHAMSAEI, CARTER, VAILLANCOURT; 2022).

3.5 TRANSFERÊNCIA DE CALOR

De acordo com Castro (2015), quando ocorre uma variação de temperatura entre dois pontos, essa temperatura tende a encontrar um equilíbrio, por meio de passagem de energia térmica, que é conhecida como a transferência de calor. A energia que um corpo adquire na forma de calor pode ser convertida em energia interna, que causa um aumento de temperatura. A transferência de calor ocorre por três processos, sendo eles a condução, convecção e radiação. Na condução, a transferência de energia interna se dá pelo movimento de elétrons e colisões microscópicas de partículas e de fônons, as vibrações de rede. De fato, as moléculas da parte mais quente colidem com as moléculas vizinhas, e a energia cinética e potencial é transmitida às moléculas adjacentes. Já na convecção, o calor é transferido pelo transporte direto de massa. A convecção também é observada entre o ar e a superfície do pavimento asfáltico, e ocorre entre as camadas do pavimento. Quando a radiação solar atinge a superfície do pavimento, uma parte dela é refletida. No entanto, uma quantidade considerável é absorvida e transferida através do pavimento. Por fim, na radiação, é a transmissão ou emissão de energia térmica na forma de partículas ou ondas (como as eletromagnéticas) através de materiais ou do espaço (SHAMSAEI, CARTER, VAILLANCOURT; 2022). A Figura 1 apresenta esses modos de transferência de calor.

Figura 1 - Esquema simplificado do sistema de transferência de calor em pavimentos asfálticos e corpo humano.



Fonte: Do autor (2022).

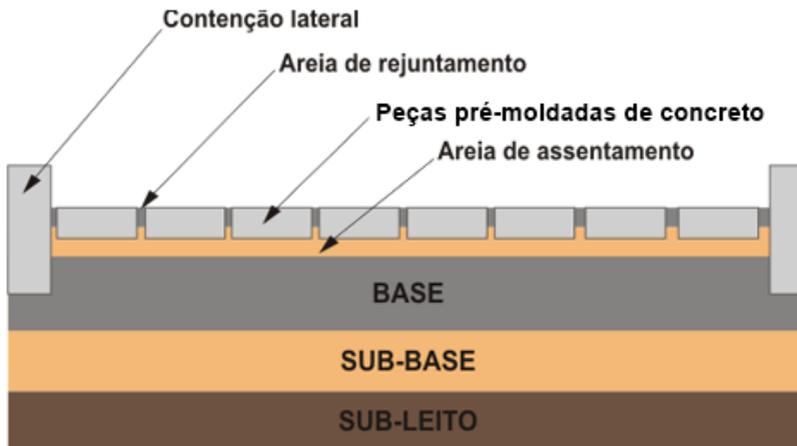
As propriedades físicas dos materiais de superfície atuam de maneira importante na transferência de calor. No entanto, a quantidade de calor absorvido ou transferido resulta da condutividade térmica, cor, rugosidade e outras propriedades dos materiais. Sendo assim, entender as propriedades termofísicas dos materiais do pavimento é fundamental para o desenvolvimento de pavimentos frios, pois essas propriedades estão relacionadas ao armazenamento e transferência de calor sem qualquer reação química nos materiais do pavimento (SHAMSAEI, CARTER, VAILLANCOURT; 2022).

3.6 PAVIMENTO INTERTRAVADO

O pavimento intertravado é um bloco pré-moldado utilizado em pavimentações. Suas características do concreto utilizado podem ser influenciadas pelos materiais e proporções que o constituem, neste sentido, pode-se destacar a relação água/cimento (a/c), tipo de cimento e os agregados (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Os blocos de concretos intertravados também conhecidos como pavers proporcionam uma engenharia atrativa além de permitir rápida substituição promovendo economia no reparo (AWOYERA et al.; 2021). A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) norma brasileira (NBR) 9781 (2013) oferece as informações necessárias para esse tipo de pavimento, tais como, os materiais, as características e os ensaios das peças. De acordo com a ABNT NBR 9781 (2013), o pavimento intertravado classifica-se como pavimento flexível, onde sua estrutura é constituída por uma camada de base (ou base e sub-base), onde as peças de concretos são apoiadas e preenchidas suas juntas em um material de assentamento, logo o intertravamento do sistema é proporcionado pela contenção, conforme apresentado na Figura 2.

Figura 2 - Estrutura de assentamento do pavimento intertravado.



Fonte: Pedreira (2014).

A areia de assentamento que serve de regularização da base, atua na distribuição das cargas e acomodação das peças. Ressalta-se que o

pavimento intertravado possui como característica o fato de ser permeável, visto que permite a passagem de parte da água da chuva para o solo por meio das juntas (DIAS et al., 2016).

O bloco de concreto intertravado deve ser durável e ter resistência à compressão suficiente para resistir as cargas veiculares (AWOYERA et al., 2021). Desta forma, segundo a ABNT NBR 9781 (2013), para tráfego de pedestres, veículos leves e comerciais de linha a resistência à compressão aos 28 dias deve ser maior ou igual a 35 MPa. Já para tráfego de veículos especiais e solicitações capazes de produzir efeitos de abrasão acentuados exige uma resistência à compressão aos 28 dias maior ou igual a 50 MPa. A amostra de peças de concreto deve apresentar absorção de água com valor médio menor ou igual a 6 %, não sendo admitido nenhum valor individual maior do que 7 %.

3.7 RESÍDUO DE VIDRO

O vidro é um material muito utilizado em virtude das suas propriedades físicas e químicas, tais como transparência, impermeabilidade, resistência mecânica, química e térmica. Os resíduos de vidro possuem circuito fechado em relação à reciclagem, porque os materiais de vidro podem ser refundidos e reutilizados em novos produtos sem perda de suas propriedades físicas ou químicas, desde que não sejam contaminados sendo um belo exemplo de economia circular (SOUZA-DAL BÓ; DAL BÓ; BERNARDIN, 2021).

O vidro leva 4 mil anos para se deteriorar, e pode ser reaproveitado inúmeras vezes. Ainda que o vidro é um material completamente reciclável a taxa de reciclagem dele é baixa. No Brasil se recicla apenas 47% da produção do vidro. O restante não reciclado se destina ao aterro sanitário. À medida que as cidades produzem o vidro e não o reaproveitam o espaço disponível para aterros vai diminuindo com o seu descarte. Uma maneira comum para reaproveitar o resíduo de vidro é reciclar ele na própria indústria de produtos de vidro. Porém, o procedimento de reciclagem é complexo. Os resíduos de vidro precisam ser separados, higienizados e derretidos (HIGUCHI et al., 2021; GUO et al., 2020; ARABI et al., 2019).

O motivo pelo qual o índice de reciclagem é baixo se trata da inclusão de mais materiais, ou seja, para ser reciclado o resíduo de vidro precisa estar desprovido de matéria orgânica, papel, plástico, metal e ainda ser separado por cores. Por consequência gera custos extras e diminui o potencial de reciclagem (HIGUCHI et al., 2021).

Em diferentes seções da sociedade, tanto no dia a dia como nas indústrias é utilizado o vidro. O vidro é composto por silicatos não cristalinos compostos por outros óxidos que atuam em suas propriedades, como CaO , Na_2O , K_2O e Al_2O_3 (SOUZA; PEREIRA; MOSSIN, 2021). Desse modo, três métodos de classificação na categoria de resíduo de vidro são considerados, sendo eles sua composição química, cor e aplicação.

Em relação à composição química, os resíduos de vidro são categorizados em vidro sodado-cálcico, vidro de chumbo, vidro borossilicato e vidro elétrico. No entanto, as principais composições químicas nos variados tipos de vidros existentes são sílica (SiO_2), carbonato de sódio (Na_2CO_3), carbonato de cálcio (CaCO_3). Quanto à cor, os vidros são divididos em vidro marrom ou âmbar, vidro verde e vidro transparente. Já na aplicação é classificado em recipiente de vidro e vidro plano. Os vidros planos normalmente são feitos de vidro calcossódico, em vidro doméstico, normalmente de vidro sodo-cálcico ou vidro de chumbo. Já a lâ mineral de isolamento é de vidro de borossilicato, e em vidro especial normalmente de vidro sodo-cálcico ou vidro borossilicato (GUO et al., 2020).

3.7.1 Aplicação do vidro

Atualmente o mundo está evoluindo para uma economia circular visando na redução de resíduos e na conservação de materiais em uso pelo maior tempo possível (FERDOUS, 2021). Como contribuição a economia circular, visa prolongar a vida útil do produto diminuindo a quantidade de resíduo de vidro presente em aterros reaproveitando-o.

A fabricação de concreto sustentável utilizando materiais residuais está se tornando popular. Os concretos produzidos com materiais alternativos vêm apresentando que é possível alcançar resistências próximas aos concretos referência (AWOYERA, 2021).

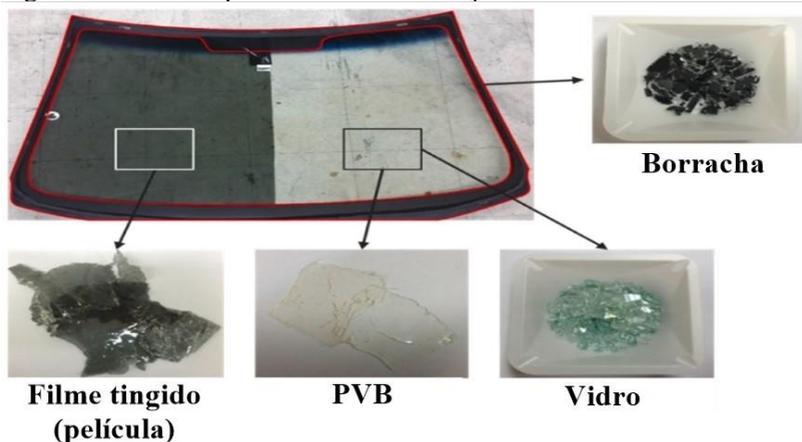
Pavimentos que utilizam resíduo de vidro melhoram as propriedades térmicas, sendo assim são chamados de pavimentos frios. Melhoram também as propriedades mecânicas, a durabilidade de longo prazo, além de trazer benefícios econômicos e ambientais, pelo fato de diminuir a presença deles em aterros sanitários resultando em um descarte adequado. O vidro usado no concreto não precisa ser fundido, logo diminui o consumo de energia. O procedimento de tratamento é simplificado, não necessitando de limpeza sofisticada (GUO et al., 2020).

A inclusão ou substituição ideal do resíduo de vidro em materiais cimentícios vem sendo estudada e avaliada conforme cada caso em específico, bem como seu tamanho de partícula utilizado, pois afeta as propriedades frescas, mecânicas, térmicas, elétricas, reológicas e sua microestrutura (DONG; LI; TAO, 2021).

3.7.2 Vidro de para-brisas

O vidro de para-brisas é composto por um vidro laminado que corresponde em duas ou mais camadas de vidros planos unidos por um polímero orgânico conhecido como polivinilbutiral (PVB). O uso de PVB em vidros de para-brisas se faz necessário onde demanda forte ligação e adesão, evitando que em um acidente o vidro quebre e machuque pessoas, pois o mesmo fica preso/colado no polímero. Desta forma, o vidro de para-brisa apresenta dificuldades para a sua reciclagem, em função da necessidade de separar completamente o vidro do PVB, sendo destinados e descartados em aterros sanitários (ARABI et al., 2019). A Figura 3 apresenta uma imagem do vidro de para-brisa e seus respectivos materiais.

Figura 3 - Vidro de para-brisa com indicações de seus materiais.



Fonte: adaptado de (SWAIN; RYANG; LEE, 2022).

3.8 PEDRA SÃO TOMÉ

Segundo Alecrim (2009), os quartzitos são comercialmente conhecidos como “pedra São Tomé ou mineira”. Os quartzitos geralmente são brancos podendo ter alterações de cores para amarelo, vermelho ou acastanhado.

Parte do Estado de Minas Gerais é conhecida nacionalmente pela produção de quartzitos que são utilizados como revestimentos na construção civil. A cidade São Tomé das Letras fica localizada ao Sul de Minas Gerais e possui a mineração como principal atividade econômica (MAIA et al., 2010). O processo de extração de quartzito na cidade de São Tomé e região gera em torno de 92% de resíduos, onde somente 8% do material é aproveitado, gerando um certo impacto ambiental (BARBOSA, 2008).

A pedra São Tomé é comumente aplicada em fachadas, calçadas e piscinas onde desempenha um bom comportamento térmico (CASTRO, 2015). É conhecida também por “pedra fria”, por se tratar de uma rocha porosa e com uma boa absorção de água. Desta forma, quando empregada em usos externos, a pedra São Tomé tem potencial para reduzir o fluxo de calor para ambientes internos. Por motivos de que ao receber a radiação solar, ela possui baixa propagação de calor, agregando uma contribuição positiva para o ambiente (QUEIROZ; MELO, 2018).

3.9 VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS

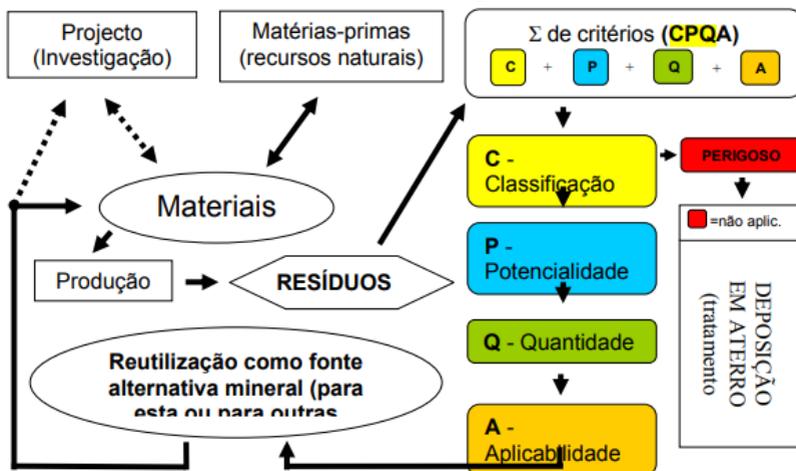
Com foco no crescimento econômico sustentável e alinhada com o desenvolvimento ambiental a economia circular fornece um fluxo processual cíclico que auxilia na redução dos impactos ambientais. A valorização de resíduos possui o intuito de reduzir o desperdício de materiais além de possibilitar redução de custos e insumos, aproveitando e promovendo o uso inteligente dos materiais em obras de engenharia para proporcionar o desenvolvimento econômico, regional e social (ROQUE; PIERRI, 2018).

Dentro do ciclo dos materiais, que visa uma solução aos desafios de sustentabilidade, no que diz respeito à gestão de resíduos e carência de recursos, os componentes de um produto podem ser reutilizados no desenvolvimento de novos produtos, reciclados ou devolvidos ao meio ambiente (CALLISTER; RETHWISCH, 2021).

Para uma estratégia viável de valorização de resíduos, Raupp-Pereira (2006), resumiu as relações que classificam os aspectos principais

à valorização, através da concepção de quatro critérios sistemáticos, conforme mostrado na Figura 4.

Figura 4 - Representação esquemática do estudo de qualificação de resíduos como materiais alternativos de engenharia.



Fonte: Raupp-Pereira (2006).

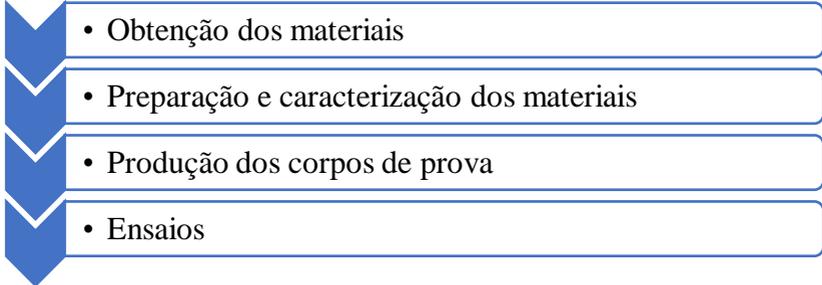
Como mostra na imagem CPQA se trata de: Classificação, Potencialidade, Quantidade/viabilidade e Aplicabilidade do resíduo. Abrange os aspectos indispensáveis para a valorização de resíduos (RAUPP-PEREIRA, 2006).

Desse modo de acordo ainda com Raupp-Pereira (2006), a caracterização físico-química auxilia a definir o critério de potencialidade (P), sendo assim, a análise química e as suas caracterizações são fundamentais nesta definição. Para o emprego do resíduo para tal uso se faz necessário verificar a quantidade (Q) do resíduo disponível, para que por fim se teste e aplique (A) na criação de novos materiais.

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

As principais etapas desenvolvidas nesta pesquisa estão organizadas conforme apresentadas no fluxograma da Figura 5.

Figura 5 - Fluxograma representativo das principais etapas do procedimento experimental.



Fonte: Do autor (2022).

O detalhamento das etapas é apresentado nas seções seguintes.

4.1 OBTENÇÃO DOS MATERIAIS

Foi utilizado para esse trabalho o cimento Pozosul CP V- ARI RS. Os agregados miúdos utilizados foram a areia fina, pó de pedra, subproduto da indústria automotiva - vidro laminado com Polivinilbutiral (PVB) e pedra São Tomé. Como agregado graúdo foi utilizada a brita 0 (granulometria 4,8 mm a 9,5). Todos os materiais foram obtidos por meio de fornecedores localizados no Sul de Santa Catarina.

Os resíduos de vidros provenientes de para-brisas descartados foram coletados em uma oficina localizada no município de Braço do Norte – SC. Foram coletadas 36 unidades de para-brisas para o presente estudo. A Figura 6 apresenta uma imagem do vidro de para-brisa coletado.

Figura 6 - Para-brisa estocado no local em que foram coletados.



Fonte: Do autor (2022).

O resíduo de pedra São Tomé foi coletado em uma marmoraria localizada no município de Criciúma – SC. Foram coletados 250 kg de resíduo de pedra São Tomé para o estudo. A Figura 7 apresenta uma imagem do resíduo de pedra São Tomé coletado.

Figura 7 - Resíduos de pedra São Tomé coletados em marmoraria localizada em Criciúma – SC.



Fonte: Do autor (2022).

4.2 PREPARAÇÃO DOS MATERIAIS

A preparação consistiu na moagem dos resíduos de vidro laminado e de pedra São Tomé. Todas as atividades foram realizadas no IPARQUE da UNESCO.

4.2.1 Moagem do resíduo de vidro

Os resíduos de vidros foram cortados manualmente com auxílio de uma esmerilhadeira visando fragmentá-lo em menores tamanhos para ser introduzido no moinho. Posteriormente, como mostra a Figura 8, foram cominuídos em um moinho de martelo, marca Furlan, modelo MM MANCHESTE com grelhas de 8 mm, rotação 1100 - 1200 rpm. Na sequência foi realizado um peneiramento, com a peneira malha $\frac{1}{4}$ de abertura 6,30 mm para separar as partículas maiores de material polimérico. Em seguida, foi realizada uma nova moagem, mesmo equipamento supracitado, com grelhas de 2 mm.

Figura 8 - (A) Resíduo de vidro cortado em tamanhos menores. (B) Moagem do resíduo de vidro no moinho martelo.



Fonte: Do autor (2021).

4.2.2 Moagem do resíduo de pedra São Tomé

As pedras São Tomé com maiores dimensões foram fragmentadas manualmente com auxílio de uma marreta para serem introduzidas no moinho de martelo. A moagem ocorreu em um moinho de martelo marca Furlan, modelo MM MANCHESTE com grelhas de 8 mm, rotação 1100 - 1200 rpm, o mesmo equipamento utilizado para cominuição do resíduo de vidro. Posteriormente, com o produto da moagem foi realizada uma

análise granulométrica. A Figura 9 mostra as etapas de cominuição da pedra São Tomé.

Figura 9 - (A) Redução do tamanho da Pedra São Tomé com auxílio de uma marreta. (B) Moagem da Pedra São Tomé em um moinho martelo.

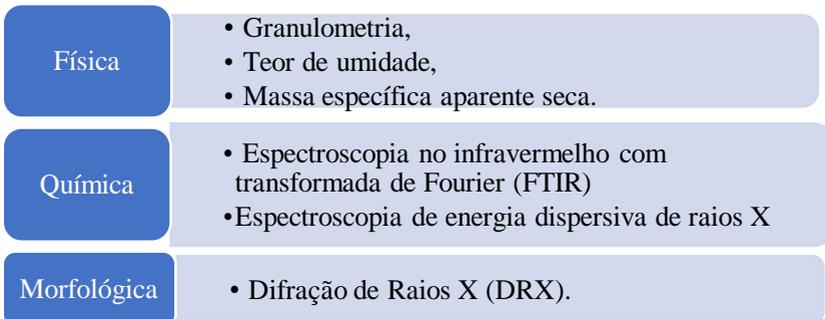


Fonte: Do autor (2022).

4.3 CARACTERIZAÇÕES DOS MATERIAIS

Os materiais utilizados neste trabalho foram caracterizados com o intuito de conhecer suas características físicas, químicas e morfológicas. O fluxograma da Figura 10 representa os ensaios de caracterização realizados neste trabalho.

Figura 10 - Fluxograma representativo dos ensaios de caracterização dos materiais.



Fonte: Do autor (2022).

Os ensaios físicos e o FTIR foram realizados no IDT– Instituto de Engenharia e Tecnologia da UNESC, Central de Caracterização de Materiais II (CeCaM II). O ensaio de análise química por espectroscopia de energia dispersiva de raios X e a difração de raios X (DRX) foram realizados no laboratório de reciclagem e tratamento de resíduos e extração (LAREX) localizado no departamento de Engenharia Química da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. A análise química por espectrometria de fluorescência de raios X (FRX) no resíduo de vidro foi realizada no laboratório de desenvolvimento e caracterização de materiais (LDCM) realizada no Instituto Senai de Tecnologia em Cerâmica

4.3.1 Distribuição granulométrica

O ensaio físico de distribuição granulométrica é realizado para verificar a dimensão máxima característica e o módulo de finura dos agregados miúdos e graúdos. Para isso adotou-se os procedimentos da ABNT NBR NM 248 (2003). É interessante essas características estarem entre os limites inferiores e superiores, pois auxiliam na compactação do concreto produzido, preenchendo vazios (NBR 7211, 2009).

Os ensaios de distribuição granulométrica dos agregados miúdos e graúdo foram realizados no laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) do IDT. Para realização do ensaio, as amostras foram secas em estufa a 105 ± 5 °C por um período de 24 horas. Após resfriadas à temperatura ambiente foi realizado um quarteamento pelo método de pilha alongada da amostra de areia fina e do pó de pedra conforme a Figura 11, visando obter uma amostra representativa. Em seguida foram necessários alguns equipamentos bem como, pincéis, balança e um conjunto de peneiras de diferentes malhas para as granulometrias, cujas malhas se encontram descritas na Tabela 1. Após o peneiramento foram identificadas as massas retidas em cada peneira.

Figura 11 - Quarteamento e homogeneização da amostra. (A) Areia fina. (B) Pó de pedra.



Fonte: Do autor (2022).

Tabela 1 - Conjunto de peneiras das séries normal e intermediária (abertura nominal).

Série normal	Série intermediária
75 mm	-
-	63 mm
-	50 mm
37,5 mm	-
-	31,5 mm
-	25 mm
19 mm	-
-	12,5 mm
9,5 mm	-
-	6,3 mm
4,75 mm	-
2,36 mm	-
1,18 mm	-
0,60 mm	-
0,30 mm	-
0,15 mm	-

Fonte: ABNT NBR NM 248:2003.

Para a obtenção dos resultados do ensaio de distribuição granulométrica foi necessário calcular a porcentagem retida (%), porcentagem acumulada (%), módulo de finura e diâmetro máximo do agregado (mm), além de determinar a massa de material retido (g) medindo a massa (g) retida em cada peneira. A porcentagem retida

(%retida) e o módulo de finura (m_f) foram calculados de acordo com as Equações 1 e 2 respectivamente.

$$\%_{\text{retida}} = \frac{m_{\text{retida em cada peneira}}}{m_{\text{total da amostra}}} \times 100 \quad (1)$$

$$m_f = \frac{\Sigma\% \text{ acumuladas das peneiras série normal}}{100} \quad (2)$$

Por fim, a dimensão máxima do agregado corresponde à abertura nominal da peneira da série normal ou intermediária, em milímetros, em que o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa (NBR NM 248, 2003).

4.3.2 Termogravimetria (TG)

O ensaio de TG foi realizado para avaliar o comportamento térmico de cada amostra submetida a uma mudança controlada de temperatura nas amostras de pavers, do resíduo de vidro e da pedra São Tomé. Utilizou-se a técnica de análise térmica diferencial (DTA) para a realização deste ensaio pelo equipamento SDT Q 600, da marca NETZSCH, modelo STA 449F3 JUPITER, localizado no CeCaM II. Em relação aos procedimentos, foi utilizada uma taxa de aquecimento de 10 °C/min, variando a temperatura de 35°C até 1.000°C, sob fluxo de nitrogênio de 60 mL/min. As amostras destinadas a esta análise foram passantes na peneira de malha de 0,075 mm.

4.3.3 Difração de Raios X (DRX)

Esta técnica foi realizada no resíduo de vidro, na pedra São Tomé, no cimento e nos pavers produzidos no seu estado endurecido. Este ensaio teve como objetivo identificar as fases cristalinas das amostras e dos pavers. Foi utilizado o equipamento Rigaku, modelo Miniflex 300 com radiação $\text{CuK}\alpha$ de 1,541862 Å, voltagem de 30 kV e corrente elétrica de 10 mA. As amostras foram lidas entre 20° e 100° (2 θ) e velocidade de 0,02°/s.

4.3.4 Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

Esta técnica foi realizada no resíduo de vidro, no resíduo de pedra São Tomé e nos pavers produzidos, no seu estado endurecido. Este ensaio teve como objetivo identificar as bandas das ligações presentes nas amostras e dos pavers. A análise FTIR foi feita em um espectrofotômetro Bruker Tensor II com acessório de reflectância total atenuada (ATR) do CeCaM II/IDT/UNESC, na região de 4.000 a 400 cm^{-1} , com resolução de 4 cm^{-1} e 200 varreduras.

4.4 MISTURA DOS EXPERIMENTOS

As misturas dos experimentos seguiram os padrões de dosagens e misturas para a obtenção dos concretos. Todas as atividades realizadas nesta etapa foram desenvolvidas em uma empresa localizada na cidade de Tubarão – SC.

4.4.1 Dosagem dos pavers

Para o desenvolvimento da mistura referência foi utilizado o traço de 1:1:0,5:5 para cimento, areia fina, pedrisco, pó de pedra respectivamente, e uma umidade ótima de 8%. Depois do traço referência foram realizadas misturas com diferentes porcentagens de resíduos de vidro e de resíduo de pedra São Tomé conforme apresentado na Tabela 2 que foram substituídos no pó de pedra.

Tabela 2 - Quantidade de resíduo de vidro e de pedra São Tomé substituído no pó de pedra na mistura dos concretos para confecção dos pavers.

Descrição	Substituição (%)	
	Resíduo de vidro	Resíduo Pedra São Tomé
P _{ref}	0	0
P _{V0, PST30}	0	30
P _{V30, PST0}	30	0
P _{V30, PST30}	30	30
P _{V15, PST15 (1)}	15	15
P _{V15, PST15 (2)}	15	15

Fonte: Do autor (2022).

De acordo com as denominações acima as misturas dos concretos produzidos nesta pesquisa foram dosadas conforme apresentado na Tabela 3. Essa quantidade de material foi utilizada a fim de conseguir utilizar o equipamento para a mistura e produção de pavers obtendo a quantidade necessária para os ensaios.

Tabela 3 - Tipos de pavers produzidos, com seus materiais constituintes e quantidades para a produção do volume de concreto necessário para os ensaios.

Nomenclaturas	Cimento (kg)	Dosagens dos concretos				
		Areia Fina (kg)	Brita 0 (kg)	Pó de pedra (kg)	Resíduo de Vidro (kg)	Resíduo de pedra São Tomé (kg)
P _{ref}	40	40	20	200	-	-
P _{V0, PST30}	40	40	20	140	-	60
P _{V30, PST0}	40	40	20	140	60	-
P _{V30, PST30}	40	40	20	80	60	60
P _{V15, PST15 (1)}	40	40	20	140	30	30
P _{V15, PST15 (2)}	40	40	20	140	30	30

Fonte: Do autor (2022).

4.5 MISTURA E MOLDAGEM DOS PAVERS

A mistura do material foi realizada em um equipamento Vibro Prensa, modelo MBP-4, marca Menegotti, em que o concreto é prensado, vibrado e compactado em um processo hidráulico e automatizado, que gera 12 unidades por vez. Os pavers foram confeccionados com dimensões de 100mm x 200mm x 80mm. A quantidade de pavers produzidos para cada amostra foi de pelo menos cinquenta unidades.

4.6 ENSAIOS DOS PAVERS NO ESTADO ENDURECIDO

Os ensaios realizados nos concretos no estado endurecido foram os de absorção de água, índice de vazios, massa específica aparente seca, compressão, ensaios térmicos. Todos esses ensaios foram realizados no IDT / UNESC.

4.6.1 Ensaio de absorção de água

O ensaio de absorção de água foi realizado com o intuito de determinar a capacidade do paver em absorver água do seu meio externo para o meio interno, através dos espaços vazios existentes, quanto menor for a porosidade da peça, menor será a quantidade de água absorvida, na resultando em menores índices de absorção e maior resistência mecânica. Este ensaio foi realizado com corpos de provas curados com 50 dias. Para avaliar a absorção de água dos corpos de prova, eles foram escovados, para remover o pó e as partículas soltas, e em seguida imersos em água à temperatura de 23 ± 5 °C durante 24 horas. As peças foram drenadas sobre uma tela metálica durante 1 minuto e secas por um pano úmido, para retirar a água superficial visível, e pesadas individualmente. O procedimento se repetiu a cada 2 horas até que não se registrou diferença superior a 0,5% em massa em relação ao valor anterior. Posteriormente, encaminharam-se as peças saturadas para uma estufa à temperatura de 110 ± 5 °C por 24 horas. As massas foram verificadas a cada duas horas até não serem registradas diferenças superiores a 0,5% em massa, sendo realizados no LMCC/IDT/UNESC de acordo com os procedimentos padronizados pela NBR 9781 (2013). A absorção de água foi obtida por meio da Equação 3.

$$\text{Absorção de água} = \frac{M_{\text{sat}} - M_s}{M_s} \times 100 \quad (3)$$

Em que:

M_{sat} = Massa do corpo-de-prova saturado;

M_s = Massa do corpo-de-prova seco em estufa

4.6.2 Ensaio de índice de vazios

Esse ensaio foi realizado nos pavers com o intuito de determinar a quantidade de poros existentes. Foram utilizados corpos de prova com 50 dias de cura, onde esses foram colocados em estufa a 105 ± 5 °C por um período de 72 horas. Na sequência, foram pesados para obtenção de sua massa seca e imersos em água por 72 horas. A conclusão do processo de saturação se deu em um recipiente com água em ebulição durante 5 horas, depois deste tempo, permaneceram imersos até o resfriamento natural à temperatura de 23 ± 2 °C. A massa do corpo de prova saturado imerso em água foi expressa após a retirada do recipiente com o auxílio de uma balança hidrostática e verificou-se a massa do corpo de prova saturado após a secagem com pano úmido, de acordo com os procedimentos padronizados pela ABNT NBR 9778 (2009), realizados no LMCC/IDT/UNESC. O índice de vazios foi obtido por meio da Equação 4.

$$I_v = \frac{M_{\text{sat}} - M_s}{M_{\text{sat}} - M_i} \times 100 \quad (4)$$

Em que

I_v : índice de vazios (%);

M_{sat} : massa da amostra saturada em água após imersão e fervura (g);

M_s : massa da amostra seca em estufa (g);

M_i : massa da amostra saturada imersa em água após fervura (g).

4.6.3 Ensaio de massa específica aparente seca

Esse ensaio foi realizado com intuito de determinar as possíveis diferenças de massas entre os tipos de pavers estudados. Utilizando corpos de prova com 50 dias de cura, foram usados os mesmos equipamentos e procedimentos dos ensaios de absorção de água e índice

de vazio, realizado de acordo com os procedimentos padronizados pela ABNT NBR 9778 (2009), no LMCC/IDT/UNESC. Os valores da massa específica aparente seca ($M_{\text{esp.seca}}$) foram obtidos através da aplicação da Equação 5.

$$M_{\text{esp.seca}} = \frac{M_s}{M_{\text{sat}} - M_i} \quad (5)$$

4.6.4 Ensaio de compressão

Esse ensaio teve como objetivo determinar as características mecânicas dos pavers produzidos com resíduo de vidro e pedra São Tomé. Os ensaios de resistência à compressão foram realizados aos 7, 21 e 28 dias. Foram utilizados 6 corpos de prova para cada composição, sendo que estes passaram por regularização das faces, um capeamento com pasta de cimento sendo uma relação de 0,4 A/C. Na sequência, os corpos de provas permaneceram por 24h imersos em um tanque com água a $23 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ para ficar saturados até o momento da ruptura. O equipamento adotado foi a prensa hidráulica EMIC PC 200, com velocidade de carregamento de 550 kPa/s, conforme estabelece a ABNT NBR 9781 (2013). Esse ensaio foi realizado no LMCC/UNESC. A Figura 12 mostra um corpo de prova na prensa hidráulica durante o ensaio de compressão.

Figura 12 - Corpo de prova de paver na prensa hidráulica, durante a realização do ensaio de compressão.



Fonte: Do autor (2022).

A resistência à compressão das peças, em MPa, foi calculada pela Equação 5, com uma área de carregamento de 4.901,67 mm².

$$f_{pi} = \frac{P}{A_c} \times p \quad (5)$$

Onde:

f_{pi} : resistência a compressão da peça (MPa);

P: carga de ruptura (N);

A_c : área de carregamento (mm²);

p: fator multiplicativo em função da altura da peça (Tabela 4).

Tabela 4 - fator multiplicativo p.

Espessura nominal da peça (mm)	p
60	0,95
80	1,00
100	1,05

Fonte: ABNT NBR 9781:2013.

A resistência à compressão característica também foi estimada pelas Equações 6 e 7.

$$s = \sqrt{\frac{\sum (f_p - f_{pi})^2}{n - 1}} \quad (6)$$

$$f_{pk,est} = f_p - t \times s \quad (7)$$

Em que

s : desvio padrão da amostra (MPa);

f_p : resistência média das peças (MPa);

f_{pi} : resistência à compressão da peça (MPa);

n : número de peças da amostra;

$f_{pk,est}$: resistência característica estimada à compressão (MPa);

t : coeficiente de Student, fornecido na Tabela 5, em função do tamanho da amostra.

Tabela 5 - Coeficiente de Student (nível de confiança de 80 %)

n	t	n	t	n	t	n	t
6	0,920	10	0,883	18	0,863	26	0,856
7	0,906	12	0,876	20	0,861	28	0,855
8	0,896	14	0,870	22	0,859	30	0,854
9	0,889	16	0,866	24	0,858	32	0,842

Fonte: ABNT NBR 9781:2013.

4.6.5 Ensaios Térmicos

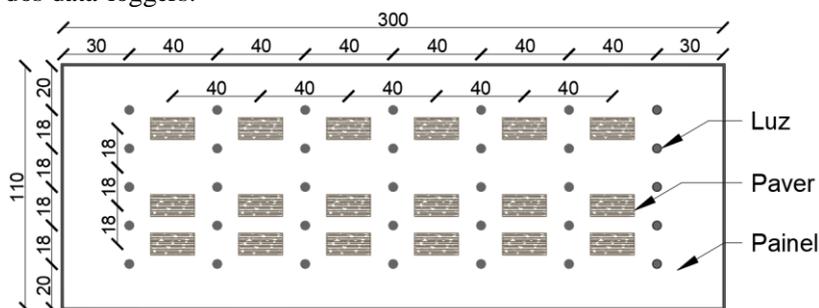
Para medir o comportamento térmico dos corpos de provas, foi avaliada a emissividade no infravermelho, utilizando uma das funções da câmera termográfica. Foram utilizados também três data-loggers (dois da marca Novus Fieldlogger S/IHM, e um da marca PicoLog) simultâneos, com termopares tipo k. A utilização destes três data-loggers se fez necessária para realizar as medições no mesmo momento para não ocorrer possíveis interferências, já que eram 18 corpos de provas. Esses ensaios foram realizados em duas etapas, sendo que na primeira etapa foi realizado em meio interno, onde os corpos de prova em triplicatas e aleatoriamente dispersos foram submetidos à radiação de luz artificial com 35 lâmpadas incandescentes com filamento de tungstênio de 100 W com bulbo transparente conforme a Figura 13. Os termopares foram colados com pasta térmica implastec na superfície do paver. A altura do painel até a base foi de 32 cm, ou seja, altura de quatro pavers. Foram realizadas três medições (dia 18 de outubro de 2022), com duração de uma hora e a coleta de dados ocorreu a cada quinze minutos, realizando então média das três medidas. As medições tiveram intervalo de uma hora entre uma e outra. A Figura 14 mostra um esquema representativo da disposição e distância.

Figura 13 - Corpos de provas de pavers sob iluminação artificial, durante a realização do ensaio de absorção de calor.



Fonte: Do autor (2022).

Figura 14 - Esquema representativo do painel utilizado no meio interno para aquecer os pavers e realizar as medições de temperaturas com auxílio dos data-loggers.



Fonte: Do autor (2022).

Em uma segunda etapa foram realizadas três medições, com duração de três horas (das 9h às 12h) cada. A coleta de dados ocorreu a cada trinta minutos, realizando então média das três medidas. As medições foram realizadas nos dias 08, 09 e 12 de dezembro de 2022. Não se mediu a intensidade luminosa do sol para o dia. A colagem e manuseio dos data-loggers e termopares ocorreu da mesma forma que na medição interna sob radiação de luz artificial porém no meio externo a céu aberto os corpos de provas foram expostos à radiação da luz solar

medida ao ar livre, foram expostos de tal forma que um corpo de prova não projetasse sombra no outro conforme apresentado na Figura 15.

Figura 15- Corpos de provas de pavers sob iluminação solar natural, durante a realização do ensaio de absorção de calor.



Fonte: Do autor (2022).

4.7 TRATAMENTO ESTATÍSTICO

Após a obtenção dos resultados experimentais, foram analisadas as significâncias estatísticas das variáveis independentes, sendo estas a substituição do resíduo de vidro e da pedra São Tomé nos resultados dos pavers. O planejamento experimental utilizado foi o fatorial 2^2+2 , para ter confiabilidade, n mínimo dois pontos centrais. Os métodos estatísticos utilizados foram ANOVA, Pareto, superfície de resposta e gráfico de médias. Sendo considerados significantes as combinações dos resultados de resistências mecânicas e das propriedades de reflexão e absorção de calor nos pavers, nos quais as substituições que tiveram o valor P-valor $< 0,1$, que corresponde à confiabilidade igual ou acima de 90%. Para essas análises estatísticas foi utilizado o software Statistica 7, versão free trial.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados alcançados nesta pesquisa são apresentados e discutidos nas seções subsequentes.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Na sequência são apresentadas as caracterizações do resíduo de pedra São Tomé, do resíduo de vidro, do cimento e dos agregados miúdos e graúdos utilizados na fabricação dos pavers em estudo.

5.1.1 Caracterização da Pedra São Tomé

5.1.1.1 Análise química

Os resultados obtidos da análise química realizada na amostra de resíduo de pedra São Tomé moída mostram que 86,09% da quantidade da composição de dióxido de silício (SiO_2). A Tabela 6 apresenta os compostos e suas respectivas quantidades identificadas na análise química do resíduo de pedra São Tomé.

Tabela 6 - Análise química do resíduo de pedra São Tomé moída.

COMPOSTO	QUANTIDADE (%)
SiO_2	86,09
K_2O	4,25
Al_2O_3	3,78
Fe_2O_3	2,41
CaO	1,43
P_2O_5	1,08
TiO_2	0,47
SO_3	0,42
ZrO_2	0,08

Fonte: Do autor (2022).

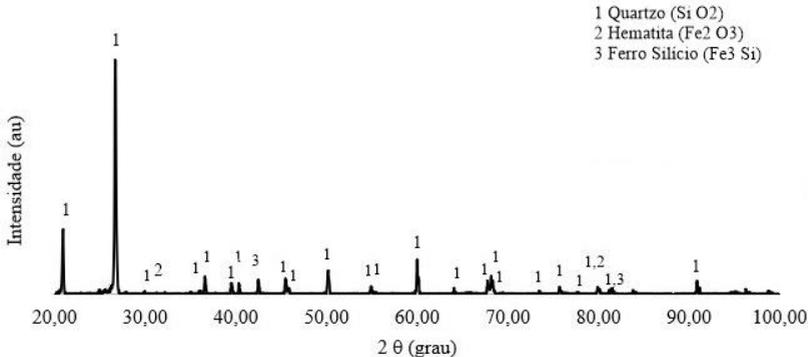
Alecrim (2009) menciona que a composição química do quartzito apresenta elevado teor de sílica (SiO_2), e adicionalmente pode conter pequena quantidade de alumínio, ferro, cálcio entre outros em menores teores. Vita et al (2022) diz que a composição do quartzito, conhecido como pedra São Tomé, varia de acordo com a sua coloração. A cor cinza

ou cinzento escuro/esverdeado possui 82% de quartzo, os amarelados possuem 95% de quartzo, os cinzas amarelados possuem na sua composição 57% de quartzo e os castanhos acinzentados ou rosado possuem 62% de quartzo e os cinzas amarelados 61% de quartzo. Portanto, como a amostra em estudo parte de um resíduo em que estavam presentes diversos tipos de pedra São Tomé, espera-se que a composição química seja heterogênea, ou seja, não seguindo o padrão de determinada tipologia de pedra. Entretanto, pode-se observar na Tabela 6 que o teor de SiO_2 aproxima-se bastante da tipologia “cinza ou cinzento escuro/esverdeado” que possui 82% de quartzo. Contudo ressalva-se que esse resultado representa a média de resíduos diversos da pedra São Tomé.

5.1.1.2 Difração de Raios X

A Figura 16 apresenta a difração de raios X do resíduo de pedra São Tomé moída.

Figura 16 - Difratograma obtido do resíduo de pedra São Tomé.



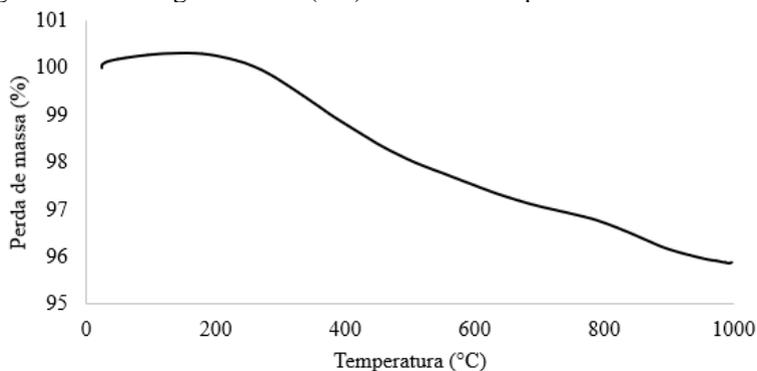
Fonte: Do autor (2022).

Pode ser visto que o quartzo (número do cartão 00-083-0539) aparece com frequência, que está presente em maior proporção em relação aos outros compostos hematita (número do cartão 00-073-0603) e ferro silício (número do cartão 00-065-0994). Esse resultado está em concordância com o encontrado por Tamilarasi *et al* (2021), afirmando que o quartzo é o principal mineral presente nas amostras de rocha.

5.1.1.3 Termogravimetria

O resultado da TG com a amostra de resíduo de pedra São Tomé moída apresenta a perda de massa do material com a variação de temperatura. A Figura 17 apresenta o resultado da análise termogravimétrica de resíduo de pedra São Tomé.

Figura 17 - Termogravimetria (TG) do resíduo de pedra São Tomé moída.



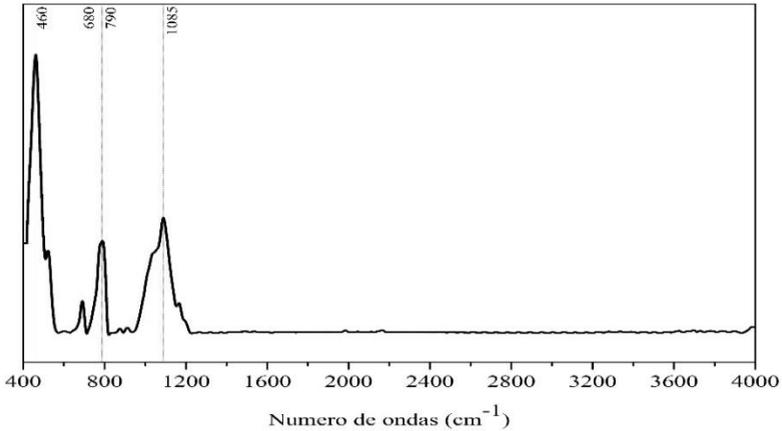
Fonte: Do autor (2022).

Analisando a Figura 17 percebe-se que a amostra de resíduo de pedra São Tomé, submetida a uma temperatura de 20°C até 1.000°C durante o ensaio, sofreu uma perda de massa de aproximadamente 4,12%.

5.1.1.4 Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier

A Figura 18 apresenta o espectro de FTIR da amostra de resíduo de pedra São Tomé moída.

Figura 18 - FTIR da amostra de resíduo de pedra São Tomé moída.



Fonte: Do autor (2022).

As bandas entre 450 a 500 referem-se à vibração Si-O-Si (OLIVEIRA et al., 2023). As bandas na região entre 780 e 800 cm^{-1} são atribuídas a vibrações de flexão e de alongamento da ligação Si-O-Si (IZZO et al., 2020). De acordo com Zhang et al. (2023), a banda a 1085 cm^{-1} também é associada com o alongamento Si-O assimétrico.

5.1.1.5 Análise granulométrica

Os resultados obtidos do ensaio de distribuição granulométrica realizado no resíduo de pedra São Tomé após o processo de cominuição mostram a variação no tamanho das partículas. A Tabela 7 apresenta os resultados da granulometria do resíduo de pedra São Tomé.

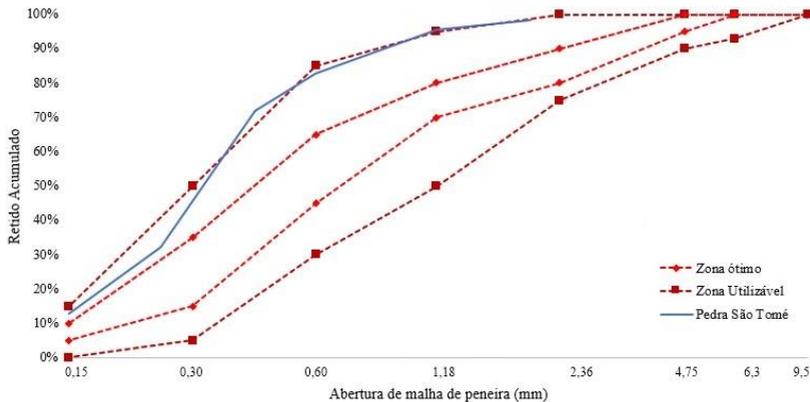
Tabela 7 - Distribuição da composição granulométrica do resíduo de pedra São Tomé.

Peneira (mm)	% Retida	% Acumulada
4,75	0	0
2,00	1,73	1,73
1,18	2,64	4,37
0,6	12,72	17,09
0,425	10,93	28,02
0,25	39,75	67,77
0,15	19,49	87,26
0,075	9,04	96,30
Fundo	3,70	100
TOTAL	-	100
Módulo de finura: 3,03		
Diâmetro máximo: 1,18 mm		

Fonte: Do autor (2022).

Analisando a Tabela 7 percebe-se que o diâmetro máximo do resíduo de pedra São Tomé foi de 1,18 mm. As partículas que constituíram esta amostra de resíduo da pedra São Tomé apresentaram diâmetros menores que 4,75 mm, sendo que 98,27% das partículas estão abaixo de 2,0 mm. Além disso, 39,75% da amostra ficou retida na peneira de 0,25 mm. Esse material também foi caracterizado pelo módulo de finura e apresentou como resultado o valor de 3,03. A Figura 19 apresenta a distribuição dos tamanhos dos resíduos de pedra São Tomé, com seus respectivos limites de finura conforme a ABNT NBR 7211 (2009).

Figura 19 - Distribuição dos tamanhos granulométricos dos resíduos de pedra São Tomé e limites estabelecidos pela norma.



Fonte: Do autor (2022).

Na Figura 19, nota-se que em relação aos limites descritos na ABNT NBR 7211 (2009), o resíduo de pedra São Tomé está entre a zona superior utilizável e a zona superior ótima. Portanto, ela atendeu parâmetros estabelecidos pela norma possuindo módulo de finura da zona utilizável superior que varia de 2,9 a 3,5.

5.1.2 Caracterização do resíduo de vidro

5.1.2.1 Análise química

Os resultados obtidos da análise química realizada na amostra de resíduo de vidro moído mostram que 71,90% da quantidade da composição de dióxido de silício (SiO_2). A Tabela 8 apresenta os compostos e suas respectivas quantidades identificadas na análise química.

Tabela 8 - Análise química do resíduo de vidro moído.

COMPOSTO	QUANTIDADE (%)
SiO ₂	71,90
Na ₂ O	12,86
CaO	8,83
MgO	3,97
Fe ₂ O ₃	0,83
Al ₂ O ₃	0,76
K ₂ O	0,24
ZnO	0,13

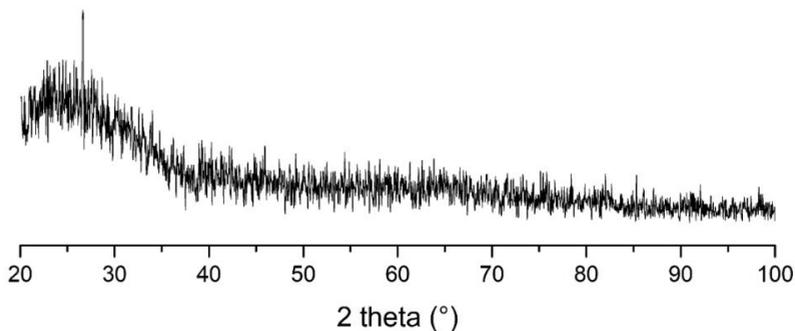
Fonte: Do autor (2022).

A quantidade do composto de dióxido de silício (SiO₂) apresentado na Tabela 8 supera os valores obtidos da composição química da amostra de resíduo de vidro laminado utilizados na pesquisa de Souza-Dal Bó, Dal Bó, Bernardin (2021), em que as camadas de vidro foram separados do PVB e encontraram em ordem decrescente a quantidade de 69,2% de SiO₂, seguido por 13,3% de Na₂O, 9,1% de CaO, 3,8% de MgO, 1,7 de Al₂O₃, 0,4% de Fe₂O₃ e 0,2% de K₂O. Ressalta-se que na presente pesquisa não foi realizado a separação.

5.1.2.2 Difração de Raios X

A Figura 20 apresenta a difração de raios X do resíduo de vidro moído.

Figura 20 - Difratoograma obtido do resíduo de vidro.



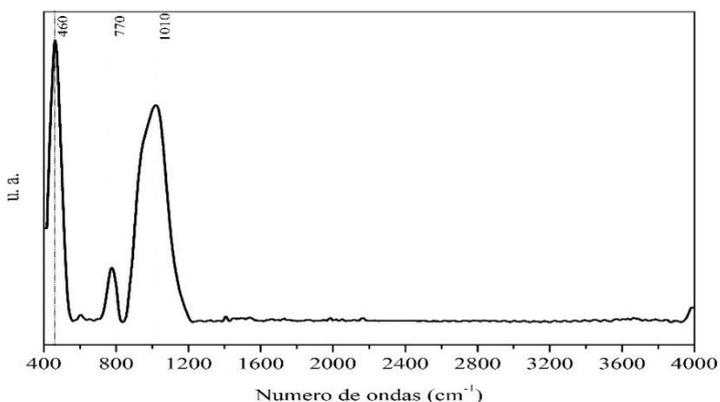
Fonte: Do autor (2022).

Pode ser visto que a amostra de resíduo de vidro consiste de um material amorfo, ou seja, não possui estrutura cristalina no resultado, é possível notar a inexistência de picos. Iglesias et al. (2022) afirmam que, a estrutura amorfa do vidro permanece inalterada, independentemente do tipo de vidro utilizado.

5.1.2.3 Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier

A Figura 21 apresenta o espectro de FTIR da amostra de resíduo de vidro moído.

Figura 21 - FTIR da amostra de resíduo de vidro moído.



Fonte: Do autor (2022).

As bandas entre 450 a 500 referem-se à vibração Si-O-Si (OLIVEIRA et al., 2023). As bandas de 770 cm^{-1} e 1010 cm^{-1} foram identificadas como sendo provenientes do silicato de sódio.

5.1.2.4 Análise granulométrica

Os resultados obtidos do ensaio de distribuição granulométrica realizado no resíduo de vidro mostram também uma variação no tamanho das partículas. A Tabela 9 apresenta os resultados da granulometria do resíduo de vidro.

Tabela 9 - Distribuição da composição granulométrica do resíduo de vidro.

Peneira (mm)	% Retida	% Acumulada
4,75	0	0
2,00	0,45	0,45
1,18	11,50	11,94
0,6	33,45	45,39
0,425	16,78	62,17
0,25	16,83	79,00
0,15	8,87	87,87
Fundo	12,13	100
TOTAL	-	100

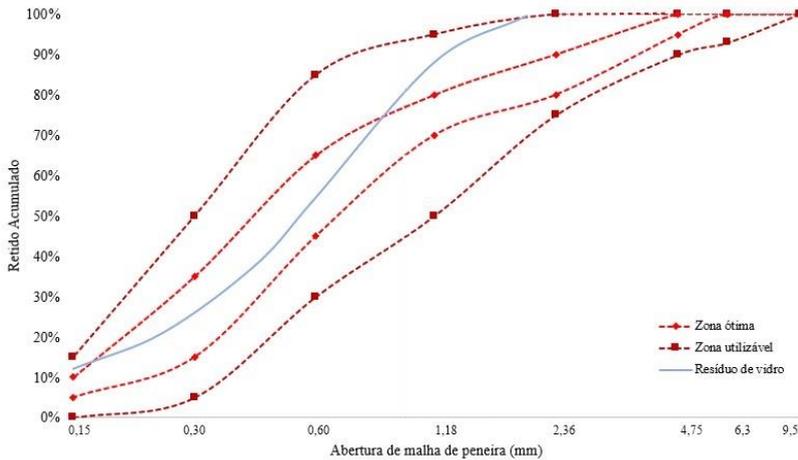
Módulo de finura: 2,87

Diâmetro máximo: 2,00 mm

Fonte: Do autor (2022).

Analisando a Tabela 9 percebe-se que o diâmetro máximo do resíduo de vidro foi de 2,00 mm. As partículas que constituíram esta amostra de resíduo de vidro moído apresentaram diâmetros menores que 4,75 mm, sendo que quase todo material está abaixo de 2,0 mm, pois 99,55% das partículas passaram desta peneira. Além disso, 33,45% da amostra ficou retida na peneira de 0,6 mm. Esse material também foi caracterizado pelo módulo de finura e apresentou como resultado o valor de 2,87. A Figura 22 apresenta a distribuição da composição granulométrica do resíduo de vidro, com seus respectivos limites de finura conforme a ABNT NBR 7211 (2009).

Figura 22 - Distribuição dos tamanhos granulométricos do resíduo de vidro e limites estabelecidos pela norma.



Fonte: Do autor (2022).

Na Figura 22, nota-se que em relação aos limites descritos na ABNT NBR 7211 (2009), o resíduo de vidro encontra-se posicionado entre a zona superior ótima e a zona superior utilizável. Portanto, atendeu parâmetros estabelecidos pela norma possuindo o módulo de finura da zona ótima que varia de 2,2 a 2,9.

5.1.3 Caracterização do cimento

5.1.3.1 Análise química

Os resultados obtidos da análise química realizada na amostra de cimento mostram que 69,40% da quantidade da composição de óxido de cálcio (CaO). A Tabela 10 apresenta os compostos e suas respectivas quantidades identificadas na análise química.

Tabela 10 - Análise química do cimento CP V - ARI RS utilizado na confecção dos pavers.

COMPOSTO	QUANTIDADE (%)
CaO	69,40
SiO ₂	14,57
Fe ₂ O ₃	6,46
Al ₂ O ₃	3,71
SO ₃	3,34
K ₂ O	1,46
TiO ₂	0,74
SrO	0,20
MnO	0,12

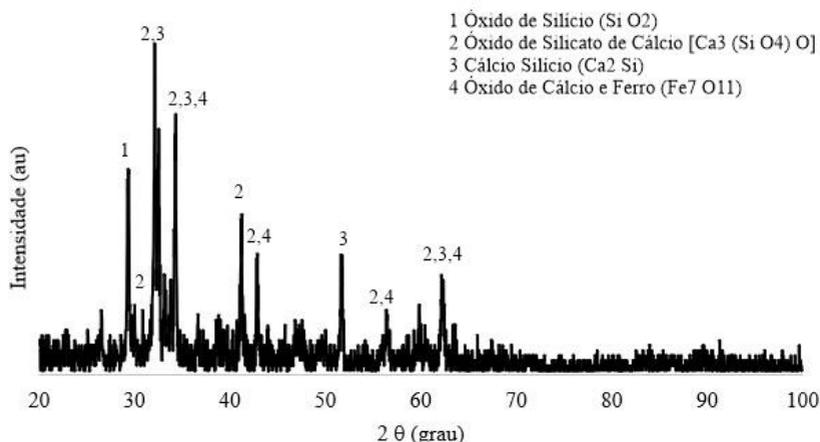
Fonte: Do autor (2022).

Quanto aos aspectos químicos do cimento CP V - ARI, Godinho et al (2020) realizaram a caracterização e encontraram 60,89% de CaO, 18,96% de SiO₂, 4,24% de Al₂O₃, 3% de SO₃, 2,66% de Fe₂O₃ e 3,87% de MgO.

5.1.3.2 Difração de Raios X

A Figura 23 apresenta a difração de raios X do cimento CP V- ARI RS.

Figura 23 - Difratograma do cimento CP V ARI RS.



Fonte: Do autor (2022).

Pode-se perceber os picos de óxido de silício (número do cartão 00-077-1060), óxido de silicato de cálcio (número do cartão 00-073-0599), cálcio silício (número do cartão 00-089-1916) e óxido de cálcio e ferro (número do cartão 00-083-1903) estão presentes na análise, estes resultados afirmam a análise química com a presença de sílica, alumina e cálcio que estão presentes no cimento. Esse resultado está em concordância com o encontrado por Nobre (2016), afirmando que os picos de maiores intensidades são dos compostos Alita Silicato tricálcio (C_3S), Belita Silicato dicálcio (C_2S). A quantidade de Alita e Belita influenciam na resistência mecânica inicial e final (SILVA; BORGES; BARAÑANO, 2021).

5.1.4 Caracterização dos agregados

5.1.4.1 Caracterização dos agregados miúdos

Os resultados obtidos dos ensaios de distribuição granulométrica realizados nos agregados miúdos (areia fina e pó de pedra) mostram a variação no tamanho das partículas. A Tabela 11 apresenta os resultados da granulometria da areia fina.

Tabela 11- Distribuição da composição granulométrica da areia fina.

Peneira (mm)	% Retida	% Acumulada
2,00	0	0
1	1,06	1,06
0,6	0,50	1,55
0,425	46,34	47,90
0,3	29,29	77,18
0,15	20,93	98,11
0,075	1,67	99,78
fundo	0,22	100
TOTAL	-	100

Módulo de finura: 3,26

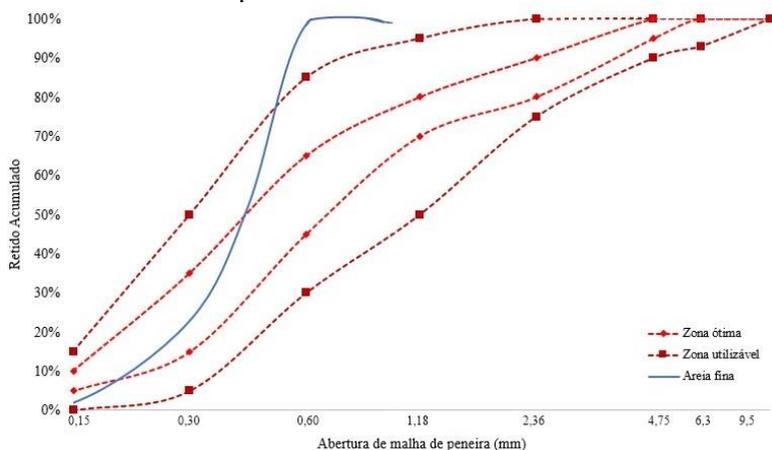
Diâmetro máximo: 0,6 mm

Fonte: Do autor (2022).

Analisando a Tabela 11 percebe-se que o diâmetro máximo da areia fina foi de 0,6 mm. As partículas que constituíram esta areia apresentaram diâmetros menores que 2,00 mm, sendo que 98,94% das partículas estão abaixo de 1,0 mm. Além disso, 46,34% da amostra do

ensaio ficou retida na peneira de 0,425 mm. Esse material também foi caracterizado pelo módulo de finura, que apresentou um valor de 3,26. A Figura 24 apresenta a distribuição dos tamanhos granulométricos da areia fina, com seus respectivos limites de finura conforme a ABNT NBR 7211 (2009).

Figura 24 - Distribuição dos tamanhos granulométricos da areia fina e limites estabelecidos pela norma.



Fonte: Do autor (2022).

Na Figura 24, nota-se que em relação aos limites descritos na ABNT NBR 7211 (2009), a areia fina apresenta uma granulometria que passa por todos os limites ótimos e utilizáveis chegando a sair da zona utilizável superior. No entanto, atendeu parâmetros estabelecidos pela norma possuindo o módulo de finura da zona utilizável superior que varia de 2,9 a 3,5. Na sequência a Tabela 12 apresenta os resultados da granulometria do pó de pedra.

Tabela 12 - Distribuição da composição granulométrica do pó de pedra.

Peneira (mm)	% Retida	% Acumulada
4,75	0	0
2,36	13,12	13,12
1,7	12,78	25,90
1,18	13,61	39,51
1	4,10	43,61
0,6	12,55	56,16
0,15	30,93	87,09
fundo	12,91	100
TOTAL	-	100

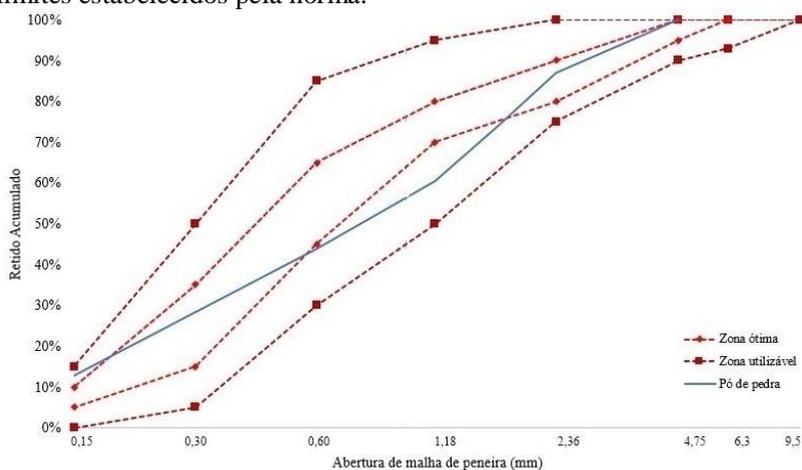
Módulo de finura: 2,65

Diâmetro máximo: 4,75 mm

Fonte: Do autor (2022).

Analisando a Tabela 12 percebe-se que o diâmetro máximo do pó de pedra foi de 4,75 mm. As partículas que constituíram esta areia apresentaram diâmetros menores que 4,75 mm, sendo que 86,88% das partículas estão abaixo de 2,36 mm. Além disso, 30,93% da amostra do ensaio ficou retida na peneira de 0,15 mm. Esse material também foi caracterizado pelo módulo de finura, que apresentou um valor de 2,65. A Figura 25 apresenta a distribuição dos tamanhos granulométricos do pó de pedra, com seus respectivos limites de finura conforme a ABNT NBR 7211 (2009).

Figura 25 - Distribuição dos tamanhos granulométricos do pó de pedra e limites estabelecidos pela norma.



Fonte: Do autor (2022).

Na Figura 25, nota-se que em relação aos limites descritos na ABNT NBR 7211 (2009), o pó de pedra também apresenta uma granulometria adequada, e encontra-se posicionado na sua maior parte entre as zonas ótimas superior e inferior. Sendo assim, ele atendeu parâmetros estabelecidos pela norma possuindo o módulo de finura da zona ótima que varia de 2,2 a 2,9.

Esses resultados mostram que a utilização da areia fina e o pó de pedra misturadas com a pedra São Tomé e o resíduo de vidro possibilitaram as mesmas ocupações de espaços vazios na mistura em função da menor dimensão da areia fina e da pedra São Tomé. Tal ocupação, segundo as conclusões de Gleize et al. (2008) contribuem para aumentar a resistência mecânica dos concretos pela redução de vazios de ar.

5.1.4.2 Caracterização dos agregados graúdos

Os resultados obtidos do ensaio de distribuição granulométrica realizado da brita nº 0 mostram também uma variação no tamanho das partículas. A Tabela 13 apresenta os resultados da granulometria da brita nº 0.

Tabela 13 - Distribuição da composição granulométrica da brita nº 0.

Peneira (mm)	% Retida	% Acumulada
19,0	0,00	0,00
9,5	15,32	15,32
6,4	43,89	59,21
4	35,65	94,86
2,4	5,08	99,94
1,2	0,06	100
fundo	0,00	100
TOTAL	-	100

Módulo de finura: 3,1
Diâmetro máximo: 19 mm

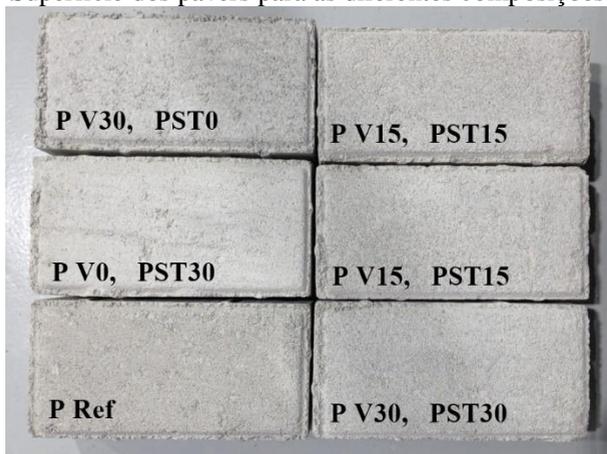
Fonte: Do autor (2022).

Analisando a Tabela 13 percebe-se que o diâmetro máximo da brita nº 0 foi de 19,00 mm. As partículas que constituíram esta brita apresentaram diâmetros menores que 19,0 mm, sendo que 84,68% das partículas estão abaixo de 9,5 mm. Esse material também foi caracterizado pelo módulo de finura, que apresentou um valor de 3,1. Além disso, 43,89% da amostra do ensaio ficou retida na peneira de 6,4 mm.

Esses resultados mostram que o incremento da brita nº 0 com os agregados miúdos visa propiciar uma compactação devido à ocupação dos agregados miúdos nos espaços vazios existentes entre as partículas dos agregados graúdo, favorecendo o aumento da resistência mecânica dos concretos. Além disso, é indispensável a presença da brita nº 0 nas misturas de concreto, de acordo com a NBR 12655 (2015). Para Passuelo et al. (2011) o agregado graúdo em conjunto com a pasta de cimento hidratado, formam uma região microestrutural de menor possibilidade de formação de fissuras, auxiliando o aumento da resistência mecânica.

Visto isso, verificou-se por meio da distribuição da composição granulométrica que com os materiais resíduo de pedra São Tomé, resíduo de vidro, areia fina e pó de pedra estão dentro dos limites de finura, possibilitando que a superfície do paver alcançasse um bom acabamento, como mostra a Figura 26.

Figura 26 - Superfície dos pavers para as diferentes composições.



Fonte: Do autor (2022).

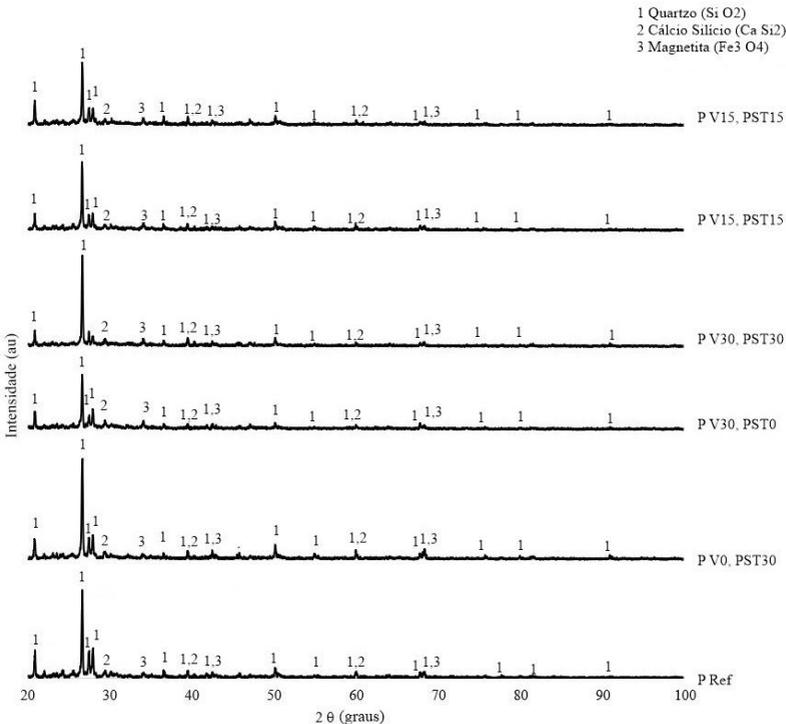
5.2 ENSAIOS DOS PAVERS NO ESTADO ENDURECIDO

5.2.1 Caracterização dos pavers produzidos

5.2.1.1 Difração de Raios X

A Figura 27 apresenta a difração de raios X dos pavers produzidos P Ref; P V0,PST30; P V30,PST0; P V30,PST30; P V15,PST15 e P V15,PST15.

Figura 27 - Difratoograma obtido dos pavers P Ref; P V0,PST30; P V30,PST0; P V30,PST30; P V15,PST15; P V15,PST15.



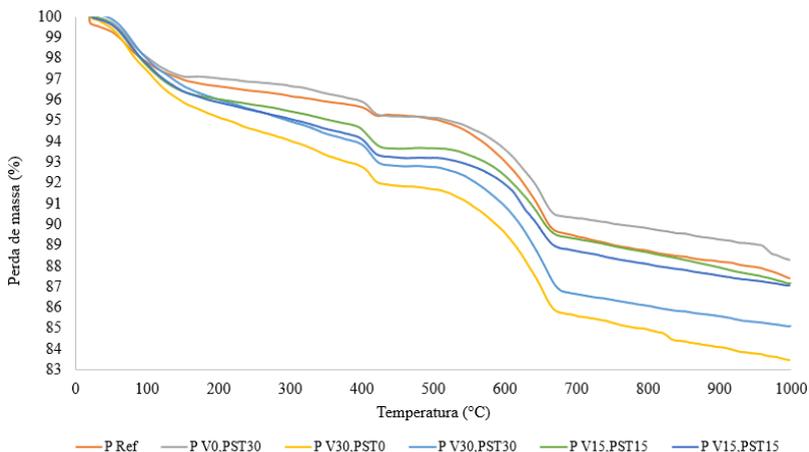
Fonte: Do autor (2022).

Pode ser visto que como nas análises anteriores, na Figura 27 não é diferente, o quartzo está presente em todas as amostras analisadas com maior intensidade. Estes resultados mostram que o quartzo (número do cartão 00-075-0443) está presente em maior proporção em relação aos outros compostos cálcio silício (número do cartão 00-086-2152) e Magnetita (número do cartão 00-089-6466).

5.2.1.2 Termogravimetria

O resultado da TG com as amostras dos pavers moídos apresenta a perda de massa do material com a variação de temperatura. A Figura 28 apresenta o resultado da análise termogravimétrica dos pavers P Ref; P V0,PST30; P V30,PST0; P V30,PST30; P V15,PST15; P V15,PST15.

Figura 28 - Termogravimetria (TG) do resíduo dos pavers moído.



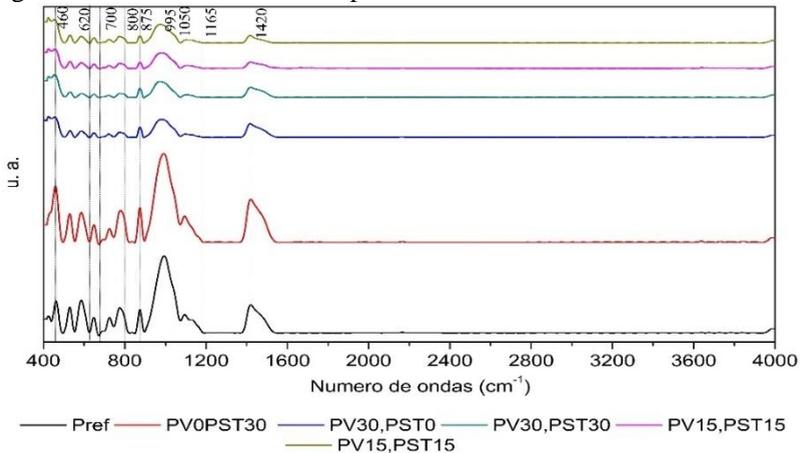
Fonte: Do autor (2022).

A Figura 28 mostra que o paver P V30,PST0, aumentou a perda de massa de concreto causada pela decomposição térmica dos materiais poliméricos presentes no resíduo de vidro. Além disso, Song et al. (2022) mencionam que a perda de água até 200°C também pode ser decorrente da desidratação de água ligada quimicamente em produtos hidratados de silicato de cálcio e etringita. Na sequência é possível perceber que as curvas de perda de massa dos concretos que possuem maior teor de resíduo de vidro em sua composição possuem maior perda de massa, seguindo então pelo P V30,PST0; P V30,PST30 e os P V15,PST15. Já o paver P V0,PST30 com o resíduo de pedra São Tomé possui uma perda de massa menor em relação aos outros pavers. A perda de massa a 400°C refere-se à decomposição do hidróxido de cálcio. Já a perda de massa em 600°C está relacionada com a degradação do CH (SALIH et al., 2022).

5.2.1.3 Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier

A Figura 29 apresenta os espectros de FTIR da amostra de pavers moídos.

Figura 29 - FTIR da amostra de pavers moídos.



Fonte: Do autor (2022).

As bandas próximas a 470 cm^{-1} referem-se ao alongamento Si-O do quartzo, bem como as bandas próximas a 620 cm^{-1} estão associadas às vibrações de alongamento simétrico Si-O (KUPWADE-PATIL et al., 2018; OLIVEIRA et al., 2023). As bandas na região entre 770 e 800 cm^{-1} são atribuídas às vibrações de alongamento simétrico Si-O, enquanto as regiões de absorção de 1050 e 1165 cm^{-1} surgem de vibrações de alongamento assimétrico Si-O (COURA; PROFETI; PROFETI, 2020).

As bandas carbonáticas próximas a 1420 cm^{-1} e próximas a 875 cm^{-1} são caracterizadas como o alongamento assimétrico e a deformação angular C-O da calcita, respectivamente. Já a banda em 995 cm^{-1} é associada ao estiramento do Si-O (JOSÉ et al., 2020; OLIVEIRA et al., 2023).

5.3.1 Absorção de água, índice de vazios e massa específica aparente seca dos concretos

A Tabela 14 apresenta os resultados de absorção d'água, índice de vazios e massa específica aparente seca das amostras de pavers.

Tabela 14 - Absorção de água (A), Índice de vazios (I_v) e Massa específica aparente seca (ρ_s) das diferentes composições.

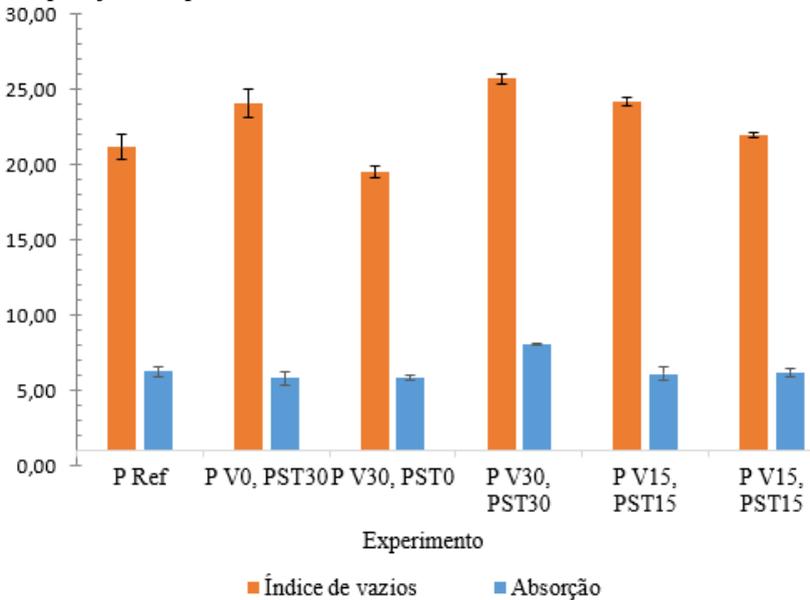
Experimento	A (%)		I_v (%)		ρ_s (g/cm ³)	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
P _{ref}	6,27	0,31	21,18	0,85	2,06	0,02
P _{V0, PST30}	5,81	0,40	24,07	0,92	1,94	0,02
P _{V30, PST0}	5,84	0,15	19,50	0,40	2,02	0,01
P _{V30, PST30}	8,06	0,02	25,71	0,34	1,93	0,01
P _{V15, PST15 (1)}	6,11	0,46	24,21	0,28	1,97	0,00
P _{V15, PST15 (2)}	6,20	0,27	21,96	0,17	2,00	0,01

Fonte: Do autor (2022).

A Tabela 14 apresenta as propriedades médias determinadas para cada experimento em relação à absorção de água, índice de vazios e massa específica. Nos Apêndices A, B e C, encontram-se os resultados utilizados nos tratamentos estatísticos, que incluíram todas as amostras. A Figura 30 mostra uma representação gráfica da absorção de água das amostras de pavers.

A Figura 30 mostra os resultados da Tabela 14, a respeito da Absorção de água (A) e do Índice de vazios (I_v).

Figura 30 - Absorção de água e Índice de vazios (Iv) das diferentes composições de pavers.



Fonte: Do autor (2022).

Pode-se perceber na Tabela 14 e na Figura 30 que o P V30, PST30 possui maior absorção de água, conseqüentemente sendo o paver com maior teor de resíduo (30% de resíduo de vidro e 30% de resíduo de pedra São Tomé).

Nota-se que o experimento com a composição P V30,PST0 apresentou o menor dos valores médios de absorção d'água (5,84 %) e índice de vazios (19,50 %). O resultado de menor índice de vazios pode ser explicado devido à inclusão do resíduo de vidro moído, de modo que esse material apresentou uma granulometria na zona ótima, que por consequência ocupa espaços vazios na mistura, ocasionando a diminuição de vazios do paver. Já os pavers com resíduos de pedra São Tomé tiveram uma maior absorção de água. Isso pode ser explicado acordo com Queiroz e Melo (2018) pelo fato de a pedra São Tomé ser porosa.

5.3.1.1 Análise estatística dos resultados de absorção de água

Os resultados obtidos do tratamento estatístico ANOVA para os resultados da absorção de água após os 50 dias são apresentados na Tabela 15.

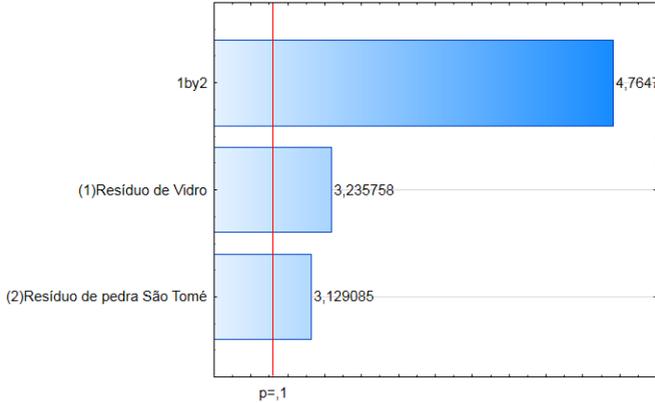
Tabela 15 - Resultados do método ANOVA para o módulo da absorção de água após 50 dias.

Fator	SS	df	MS	F	p
(1) Resíduo de vidro	0,828100	1	0,828100	10,47013	0,083694
(2) Resíduo de pedra São Tomé 1 de 2	0,774400	1	0,774400	9,79117	0,088747
Erro	0,158183	2	0,079092		
Total SS	3,556283	5			
R-quadrado = 0,95552					

Fonte: Do autor (2022).

Analisando a Tabela 15 percebe-se que todos os fatores e a interação apresentaram um valor p inferior a 0,10. Percebe-se também que o fator interação 1 de 2, ou seja, do resíduo de vidro com o resíduo da pedra São Tomé apresentou o maior valor F (22,70277), possibilitando tal fator apresentar uma melhor significância estatística em relação a eles separadamente. Desta forma, a Tabela 15 permite concluir que tais resultados são significantes estatisticamente. A Figura 31 apresenta o gráfico de Pareto dos três fatores buscando atingir os 90% de confiabilidade.

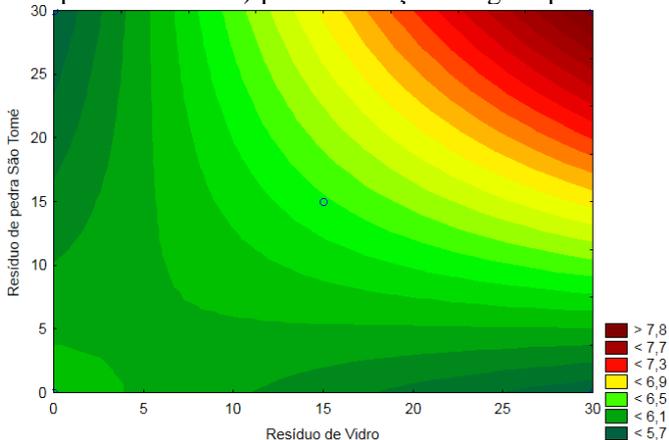
Figura 31 - Gráfico de Pareto dos fatores Resíduo de vidro, Resíduo de pedra São Tomé e 1 by 2 (Resíduo de vidro com Resíduo de pedra São Tomé) para a absorção de água após os 50 dias.



Fonte: Do autor (2022).

Analisando a Figura 31 percebe-se novamente que todos os fatores atingiram o nível de 90% de confiabilidade. A Figura 32 apresenta o gráfico de superfície de resposta que representa a relação entre as médias dos resultados de absorção de água após os 50 dias dos pavers.

Figura 32 - Gráfico de Superfície de resposta dos fatores Resíduo de vidro, Resíduo de pedra São Tomé e 1 by 2 (Resíduo de vidro com Resíduo de pedra São Tomé) para a absorção de água após os 50 dias.



Fonte: Do autor (2022).

Analisando a Figura 32 do gráfico de superfície de resposta percebe-se que o paver com substituição de até aproximadamente 5% de resíduos possui maior absorção de água se comparado com substituições de porcentagens maiores. Nota-se também que a interação dos dois resíduos obtém uma absorção de água maior, ou seja, que quanto maiores as quantidades presentes de resíduo de vidro juntamente com o resíduo de pedra São Tomé, maior é a absorção de água. A equação de regressão está descrita na Equação 8, onde “Z” representa a absorção, “(1)” resíduo de vidro e “(2)” Resíduo de pedra São Tomé.

$$Z(1,2) = 6,16 - 0,014x(1) - 0,015x(2) + 0,003x(1)x(2) + 0,26 \quad (8)$$

5.3.1.2 Análise estatística dos resultados de índice de vazios

Os resultados obtidos do tratamento estatístico ANOVA para os resultados de índice de vazios após os 50 dias são apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 - Análise estatística dos resultados de índice de vazios.

Fator	SS	df	MS	F	p
(1) Resíduo de vidro	0,00040	1	0,00040	0,00028	0,988103
(2) Resíduo de pedra São Tomé	20,70250	1	20,70250	14,65257	0,061971
1 de 2	2,75560	1	2,75560	1,95033	0,297353
Erro	2,82578	2	1,41289		
Total SS	26,28428	5			

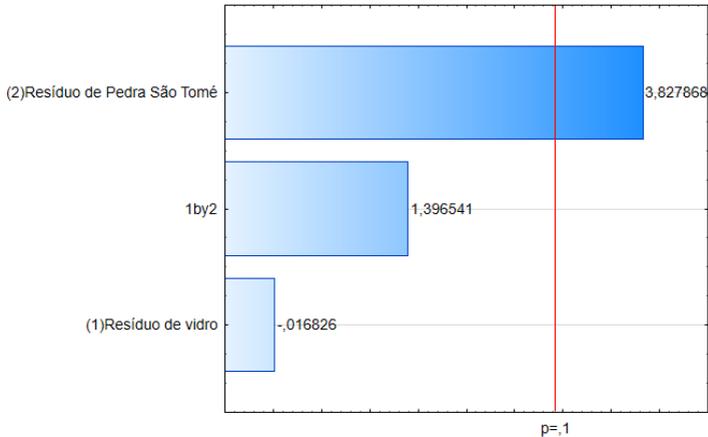
R-quadrado = 0,89249

Fonte: Do autor (2022).

Analisando a Tabela 16 percebe-se que apenas o fator resíduo de pedra São Tomé apresentou um valor p inferior a 0,10. Percebe-se também que o mesmo apresentou o valor F (20,70250), possibilitando tal fator apresentar uma melhor significância estatística em relação aos demais. Desta forma, a Tabela 16 permite concluir que a pedra São Tomé é significativa estatisticamente para o índice de vazios. O resíduo de pedra São Tomé moída apresentou um maior módulo de finura (3,03) do que o resíduo de vidro moído (2,87), fato que diminui a compactabilidade dos pavers, e por consequência, aumenta o índice de vazios. A Figura 33

apresenta o gráfico de Pareto dos três fatores buscando atingir os 90% de confiabilidade.

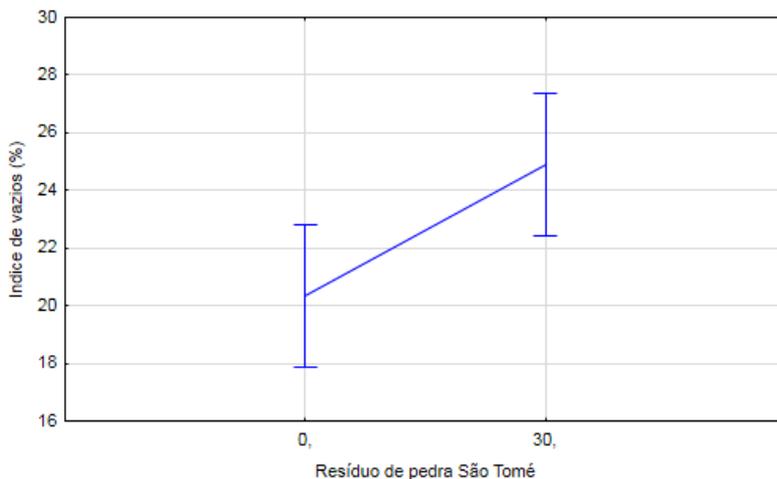
Figura 33 - Gráfico de Pareto dos fatores Resíduo de vidro, Resíduo de pedra São Tomé e 1 by 2 (Resíduo de vidro com Resíduo de pedra São Tomé) para o índice de vazios após os 50 dias.



Fonte: Do autor (2022).

Analisando a Figura 33 percebe-se novamente que o fator resíduo de pedra São Tomé alcança o nível de 90% de confiabilidade. A Figura 34 apresenta o gráfico de médias que representa a relação entre as médias dos resultados de índice de vazios dos pavers referência (P Ref) e com substituição de 30% de resíduo de pedra São Tomé (P V0,PST30).

Figura 34 - Gráfico de valores médios de índice de vazios do paver P Ref e do P V0,PST30.



Fonte: Do autor (2022).

Analisando a Figura 34 percebe-se o aumento dos valores médios de índice de vazios no paver com substituição de resíduo de pedra São Tomé em relação ao paver P Ref, de forma que os valores limites referentes ao desvio padrão de ambos não se sobrepõem. Confirmando novamente a significância estatística dos resultados para 90% de confiabilidade. A equação de regressão está descrita na Equação 9, onde “Z” representa o índice de vazios, “(1)” resíduo de vidro e “(2)” Resíduo de pedra São Tomé.

$$Z(1,2) = 21,336 + 0,096x(2) + 1,138 \quad (9)$$

5.3.1.3 Análise estatística dos resultados de massa específica aparente seca ANOVA

Os resultados obtidos do tratamento estatístico ANOVA para os resultados de massa específica aparente seca após os 50 dias são apresentados na Tabela 17.

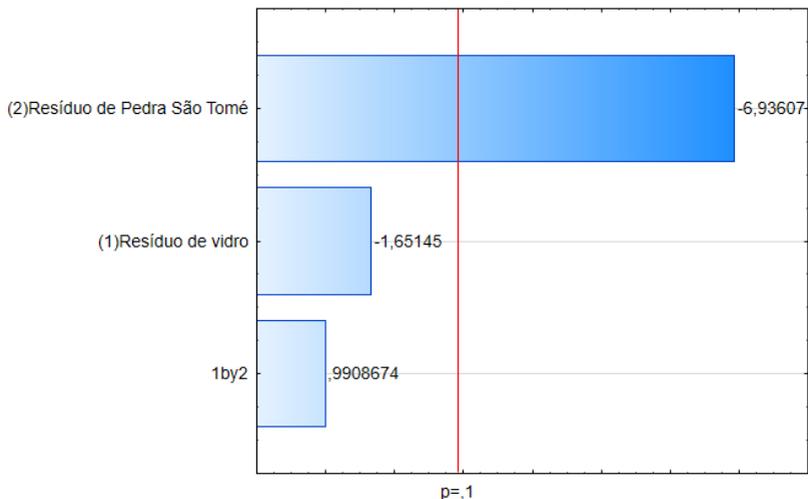
Tabela 17 - Análise estatística dos resultados de massa específica aparente seca.

Fator	SS	df	MS	F	p
(1) Resíduo de vidro	0,000625	1	0,000625	2,72727	0,240445
(2) Resíduo de pedra São Tomé	0,011025	1	0,011025	48,10909	0,020160
1 de 2	0,000225	1	0,000225	0,98182	0,426181
Erro	0,000458	2	0,000229		
Total SS	0,012333	5			
R-quadrado = 0,96284					

Fonte: Do autor (2022).

Analisando a Tabela 17 nota-se que somente o fator resíduo de pedra São Tomé apresentou um valor p inferior a 0,10. Logo, o mesmo apresentou o valor F (48,10909), possibilitando esse fator apresentar uma melhor significância estatística em relação aos demais. Sendo assim, a Tabela 17 permite concluir de que o resíduo de pedra São Tomé é significativo estatisticamente para a massa específica aparente seca. A Figura 35 apresenta o gráfico de Pareto dos três fatores buscando atingir os 90% de confiabilidade.

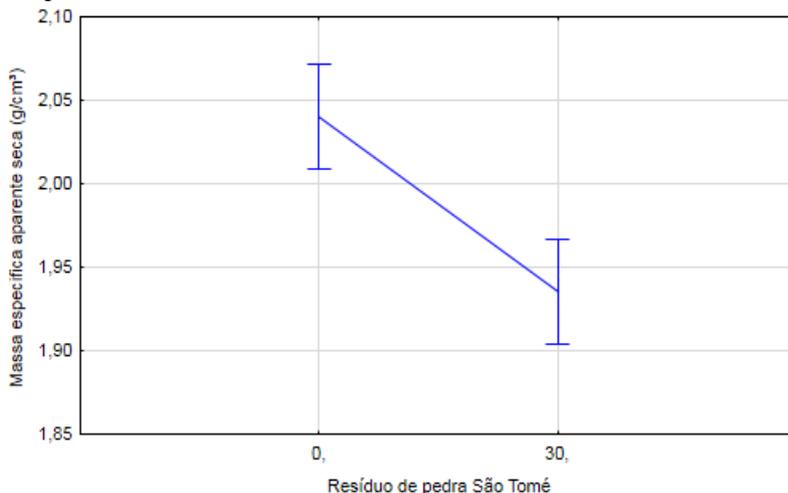
Figura 35 - Gráfico de Pareto dos fatores Resíduo de vidro, Resíduo de pedra São Tomé e 1 by 2 (Resíduo de vidro com Resíduo de pedra São Tomé) para massa específica aparente seca após os 50 dias.



Fonte: Do autor (2022).

Analisando a Figura 35 comprova-se que o fator resíduo de pedra São Tomé alcança o nível de 90% de confiabilidade, confirmando o previsto pela Tabela 17. A Figura 36 apresenta o gráfico de médias que representa a relação entre as médias dos resultados de massa específica aparente seca após os 50 dias dos pavers referência sem substituição de resíduos (P Ref) e com substituição de 30% de resíduo de pedra São Tomé (P V0, PST30).

Figura 36 - Gráfico de valores médios da massa específica aparente seca dos pavers P Ref e P V0,PST30



Fonte: Do autor (2022).

Analisando a Figura 36 percebe-se a redução dos valores médios de massa específica aparente seca após os 50 dias dos pavers P V0,PST30 em relação ao paver P Ref, de forma que os valores limites referentes ao desvio padrão de ambos não se sobrepõem, confirmando novamente a significância estatística dos resultados para 90% de confiabilidade. A equação de regressão está descrita na Equação 10, onde “Z” representa a massa específica aparente seca, “(1)” resíduo de vidro e “(2)” Resíduo de pedra São Tomé.

$$Z(1,2) = 2,059 - 0,004x(2) + 0,014$$

(10)

5.4.1 Resistência à compressão dos pavers

Os resultados obtidos dos ensaios de resistência à compressão aos 7, 21 e 28 dias nos pavers são apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 - Resistência à compressão dos pavers nos períodos de 7, 21 e 28 dias.

Experimento	Especificações	Idade dos experimentos		
		7 dias	21 dias	28 dias
P_{ref}	Média (MPa)	19,5	25,5	26,6
	Desvio Padrão (MPa)	1,70	1,86	1,38
	$f_{pk,est}$ (MPa)	17,9	23,8	25,3
P_{V0, PST30}	Média (MPa)	15,2	17,8	19,5
	Desvio Padrão (MPa)	0,90	1,12	1,63
	$f_{pk,est}$ (MPa)	14,4	16,7	18,0
P_{V30, PST0}	Média (MPa)	17,9	22,1	22,5
	Desvio Padrão (MPa)	0,98	1,06	2,00
	$f_{pk,est}$ (MPa)	17,0	21,1	20,6
P_{V30, PST30}	Média (MPa)	15,1	15,9	17,7
	Desvio Padrão (MPa)	0,71	0,82	1,49
	$f_{pk,est}$ (MPa)	14,4	15,1	16,3
P_{V15, PST15}	Média (MPa)	16,6	20,2	20,6
	Desvio Padrão (MPa)	0,80	0,92	1,70
	$f_{pk,est}$ (MPa)	15,8	19,3	19,1
P_{V15, PST15}	Média (MPa)	15,0	20,2	19,5
	Desvio Padrão (MPa)	0,10	0,81	1,85
	$f_{pk,est}$ (MPa)	14,9	19,5	17,8

Fonte: Do autor (2022).

Analisando a Tabela 18 notou-se que os pavers P V30,PST0 e P V15, PST15 reduziram a resistência à compressão nos 28 dias, os demais aumentaram sua resistência com o passar dos dias. Esse aumento da resistência se deve à evolução das reações de hidratação da pasta de cimento. O paver P V30,PST30 alcançou aos 28 dias uma resistência média à compressão (17,7 MPa, desvio padrão 1,49 MPa) inferior aos valores de resistência à compressão dos demais pavers. Isso pode ser explicado pela composição conter um maior teor de substituição de resíduo de pedra São Tomé e de vidro. Além disso, esse resultado se explica pelo fato de que o paver P V30, PST30 apresentou maior valor de índice de vazios (25,71%) e absorção de água (8,06%), o que influencia para a redução da resistência. O P V30, PST0 obteve o segundo maior valor de resistência média à compressão aos 28 dias quando comparado com os demais pavers, em função dos menores valores de absorção de

água (5,84%) e índice de vazios (19,50%). Considerando a NBR 9781/87, que normatiza a resistência mecânica para pavimentos intertravados, os valores medidos para resistência mecânica dos pavers estão abaixo do recomendado pela norma, que estabelece resistência mínima de 35 MPa para solicitações de veículos leves. A Tabela 19 apresenta valores de porcentagens média de resistência à compressão alcançada de acordo com as idades dos experimentos e em relação ao paver referência.

Tabela 19 - Porcentagens média de resistência à compressão alcançadas relacionando os pavers de 7 dias com os pavers de 28 dias, e o paver Ref com os demais.

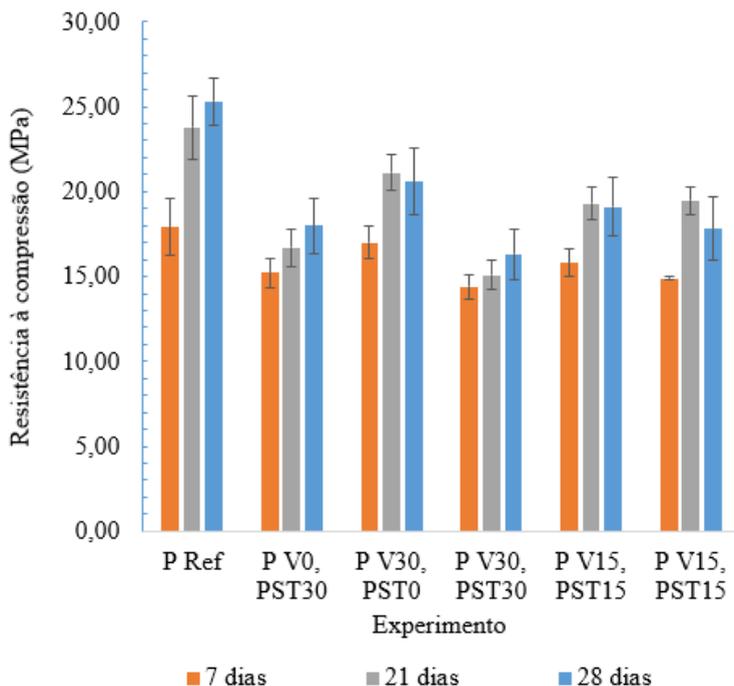
Experimento	Porcentagens relacionadas	
	7 dias/28 dias (%)	P Ref (%)
P_{ref}	73,3	-
P_{V0, PST30}	77,95	73,3
P_{V30, PST0}	79,5	84,59
P_{V30, PST30}	85	66,54
P_{V15, PST15}	80	77,44
P_{V15, PST15}	76	73,31

Fonte: Do autor (2022).

Analisando a Tabela 19 notou-se que os pavers atingiram acima de 73,3% da resistência média final de 28 dias aos 7 dias. Relacionando os pavers com resíduo ao paver referência pode se perceber que foi possível alcançar até 85% da resistência média final de 28 dias aos 7 dias. Isso se dá ao fato de haver excesso de resíduo, sendo necessário reduzir e encontrar a quantidade ideal de substituição para que alcance o traço do paver referência e na sequência ajustar para alcançar o requerido pela NBR 9781/87 de 35 MPa.

A Figura 37 apresenta os resultados de resistência à compressão aos 7, 21 e 28 dias.

Figura 37 - Resistência à compressão das amostras de pavers aos 7, 21 e 28 dias.



Fonte: Do autor (2022).

Analisando a Figura 37, pode-se notar que as resistências médias à compressão dos pavers aumentaram com o aumento do tempo de cura.

5.4.1.1 Análise estatística dos resultados da resistência à compressão aos 7 dias

Os resultados obtidos do tratamento estatístico ANOVA para os resultados de resistência à compressão após 7 dias são apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 - Resultados do método ANOVA para a resistência à compressão aos 7 dias.

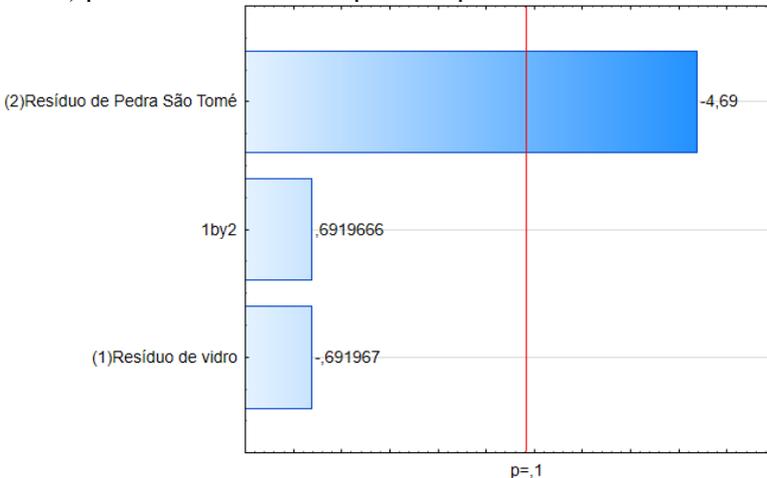
Fator	SS	df	MS	F	p
(1) Resíduo de vidro	0,20250	1	0,202500	0,47882	0,560496
(2) Resíduo de pedra São Tomé	9,30250	1	9,302500	21,99606	0,042580
1 de 2	0,20250	1	0,202500	0,47882	0,560496
Erro	0,84583	2	0,422917		
Total SS	10,55333	5			

R-quadrado = 0,91985

Fonte: Do autor (2022).

Analisando a Tabela 20 percebe-se o fator resíduo de pedra São Tomé apresentou valor p inferior a 0,1. Logo, o mesmo apresentou o valor F (21,99606). Portanto, permite concluir de que o resíduo de pedra São Tomé possui significância estatística para a resistência à compressão aos 7 dias. A Figura 38 apresenta o gráfico de Pareto dos três fatores buscando atingir os 90% de confiabilidade.

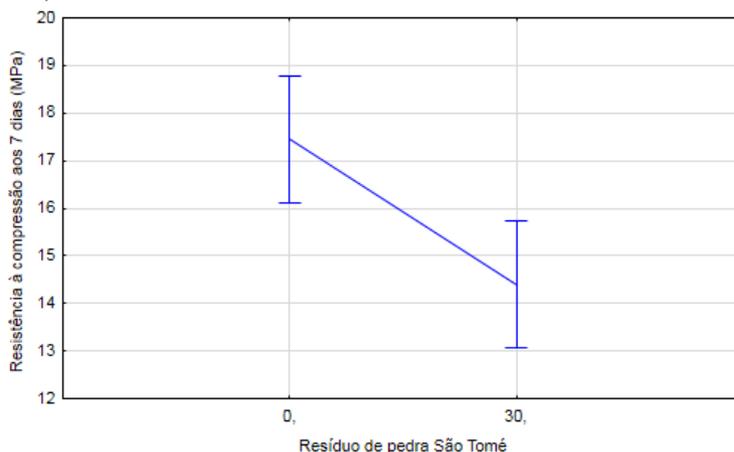
Figura 38 - Gráfico de Pareto dos fatores Resíduo de vidro, Resíduo de pedra São Tomé e 1 by 2 (Resíduo de vidro com Resíduo de pedra São Tomé) para a resistência à compressão após os 7 dias.



Fonte: Do autor (2022).

Analisando a Figura 38 percebe-se novamente o resíduo de pedra São Tomé atingiu o nível de 90% de confiabilidade. A Figura 39 apresenta o gráfico de médias que representa a relação entre as médias dos resultados de compressão aos 7 dias dos pavers sem resíduos (P Ref) e com 30% de resíduo de pedra São Tomé (P V0,PST30).

Figura 39 - Gráfico de resistências médias à compressão dos pavers P Ref e P V0,PST30 aos 7 dias.



Fonte: Do autor (2022).

Analisando a Figura 39 percebe-se a diminuição dos valores médios de resistência à compressão aos 7 dias dos concreto P V0,PST30 em relação ao paver P Ref, de forma que os valores limites referentes ao desvio padrão de ambos não se sobrepõem, confirmando novamente a significância estatística dos resultados para 90% de confiabilidade. A equação de regressão está descrita na Equação 11, onde “Z” representa a resistência à compressão aos 7 dias, “(1)” resíduo de vidro e “(2)” Resíduo de pedra São Tomé.

$$Z(1,2) = 17,708 - 0,117x(2) + 0,623$$

(11)

5.4.1.2 Análise estatística dos resultados da resistência à compressão aos 21 dias

Os resultados obtidos do tratamento estatístico ANOVA para os resultados de resistência à compressão após 21 dias são apresentados na Tabela 21.

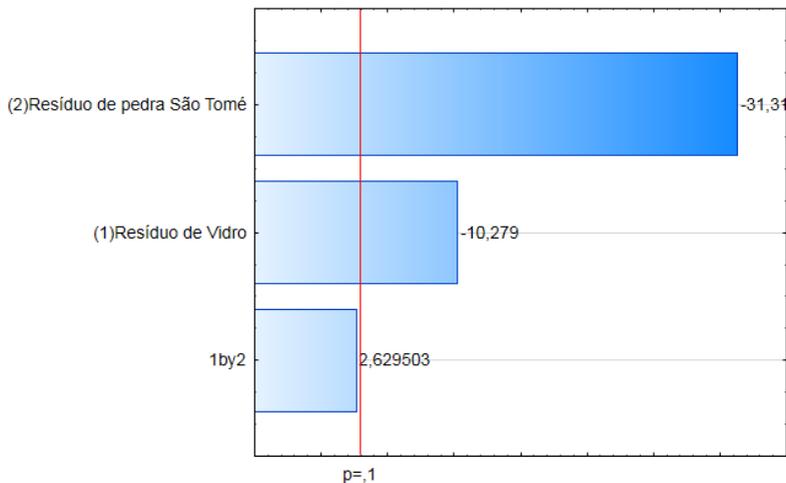
Tabela 21 - Resultados do método ANOVA para à resistência a compressão aos 21 dias.

Fator	SS	df	MS	F	p
(1) Resíduo de vidro	4,62250	1	4,62250	105,6571	0,009332
(2) Resíduo de pedra São Tomé	42,90250	1	42,90250	980,6286	0,001018
1 de 2	0,30250	1	0,30250	6,9143	0,119295
Erro	0,08750	2	0,04375		
Total SS	47,91500	5			
R-quadrado = 0,99817					

Fonte: Do autor (2022).

Analisando a Tabela 21 percebe-se tanto para o resíduo de vidro como para o resíduo de pedra São Tomé que o valor p dos fatores apresentaram valor inferior a 0,1, alcançando um R-quadrado de 0,99817. Desta forma, pode-se concluir de que tais resultados são significantes estatisticamente. A Figura 40 apresenta o gráfico de Pareto dos três fatores buscando atingir os 90% de confiabilidade.

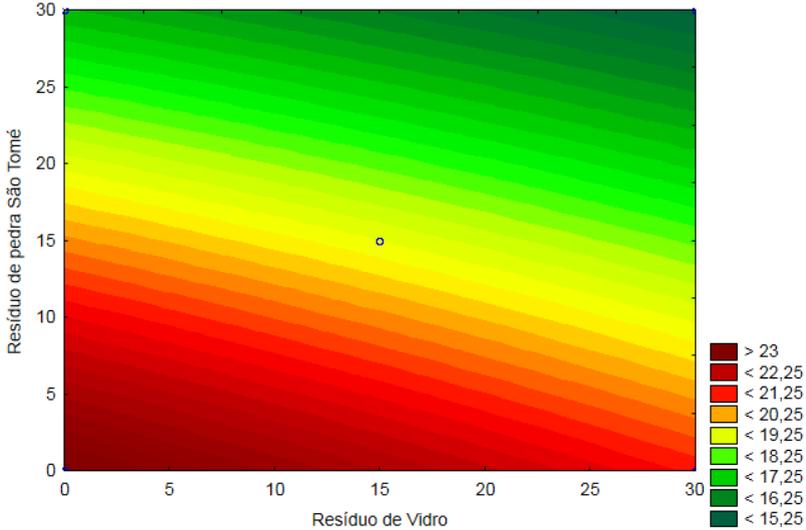
Figura 40 - Gráfico de Pareto dos fatores Resíduo de vidro, Resíduo de pedra São Tomé e 1 by 2 (Resíduo de vidro com Resíduo de pedra São Tomé) para a resistência à compressão após os 21 dias.



Fonte: Do autor (2022).

Analisando a Figura 40 percebe-se novamente que os fatores resíduo de Pedra São Tomé e resíduo de vidro atingiram o nível de 90% de confiabilidade. A Figura 41 apresenta o gráfico de superfície de resposta que representa a relação entre as médias dos resultados de resistência à compressão após os 21 dias dos pavers.

Figura 41 - Gráfico de Superfície de resposta dos fatores Resíduo de vidro, Resíduo de pedra São Tomé e 1 by 2 (Resíduo de vidro com Resíduo de pedra São Tomé) para a resistência à compressão após os 21 dias.



Fonte: Do autor (2022).

Analisando a Figura 41 do gráfico de Superfície de resposta percebe-se que a inclusão do resíduo de vidro pode ser maior do que da pedra São Tomé para uma resistência à compressão maior em um período de 21 dias e que a inclusão dos resíduos diminui a resistência à compressão e relação à referência. A equação de regressão está descrita na Equação 12, onde “Z” representa a resistência à compressão aos 21 dias, “(1)” resíduo de vidro e “(2)” Resíduo de pedra São Tomé.

$$Z(1,2) = 23,875 - 0,090x(1) - 0,237x(2) + 0,200$$

(12)

5.4.1.3 Análise estatística dos resultados da resistência à compressão aos 28 dias

Os resultados obtidos do tratamento estatístico ANOVA para os resultados de resistência à compressão após 28 dias são apresentados na Tabela 22.

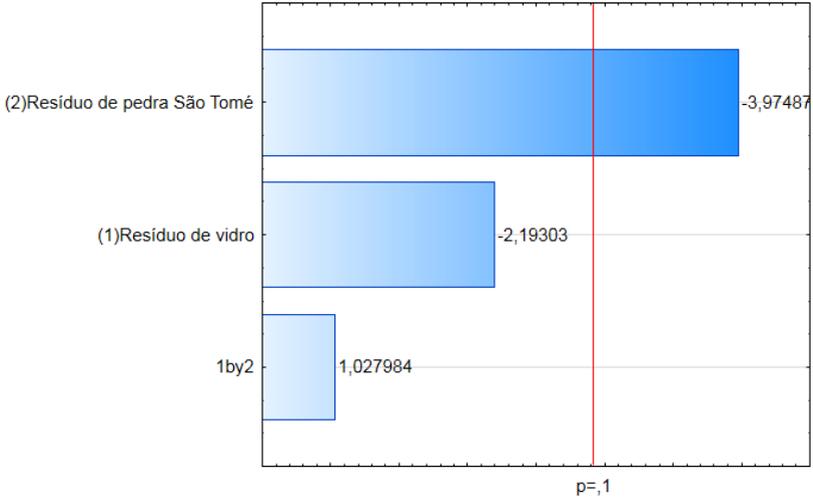
Tabela 22 - Resultados do método ANOVA para a resistência à compressão aos 28 dias.

Fator	SS	df	MS	F	p
(1) Resíduo de vidro	10,24000	1	10,24000	4,80939	0,159591
(2) Resíduo de pedra São Tomé	33,64000	1	33,64000	15,79961	0,057855
1 de 2	2,25000	1	2,25000	1,05675	0,412028
Erro	4,25833	2	2,12917		
Total SS	50,38833	5			
R-quadrado = 0,91549					

Fonte: Do autor (2022).

Analisando a Tabela 22 percebe-se que o resíduo de pedra São Tomé apresentou valor de p inferior a 0,1. Permitindo concluir de que o resíduo de pedra São Tomé possui significância estatisticamente. A Figura 42 apresenta o gráfico de Pareto dos três fatores buscando atingir os 90% de confiabilidade.

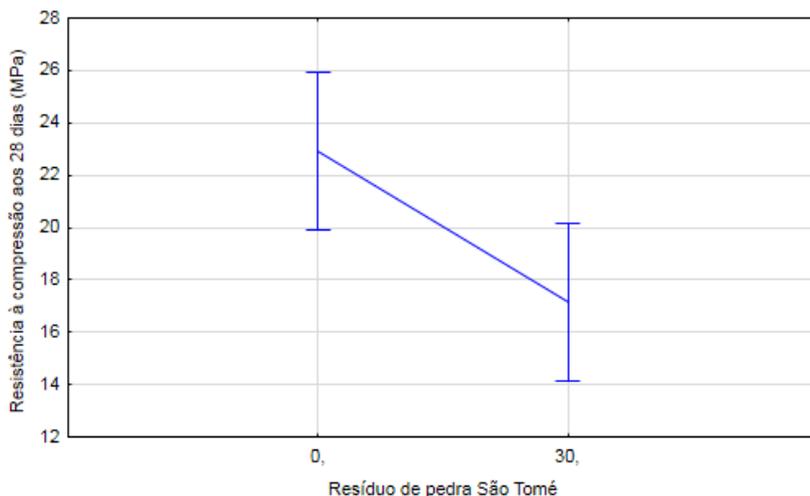
Figura 42 - Gráfico de Pareto dos fatores Resíduo de vidro, Resíduo de pedra São Tomé e 1 by 2 (Resíduo de vidro com Resíduo de pedra São Tomé) para a resistência à compressão após os 28 dias.



Fonte: Do autor (2022).

Analisando a Figura 42 percebe-se novamente que fator de resíduo de pedra São Tomé atingiu o nível de 90% de confiabilidade. A Figura 43 apresenta o gráfico de médias que representa a relação entre as médias dos resultados de compressão aos 28 dias dos pavers sem resíduos (P Ref) e com 30% de resíduo de pedra São Tomé (P V0,PST30).

Figura 43 - Gráfico de resistências médias à compressão dos pavers P Ref e P V0,PST30 aos 28 dias.



Fonte: Do autor (2022).

Analisando a Figura 43 percebe-se a diminuição dos valores médios de resistência à compressão aos 28 dias dos concreto P V0,PST30 em relação ao paver P Ref, de forma que os valores limites referentes ao desvio padrão de ambos não se sobrepõem, confirmando novamente a significância estatística dos resultados para 90% de confiabilidade. A equação de regressão está descrita na Equação 13, onde “Z” representa a resistência à compressão aos 28 dias, “(1)” resíduo de vidro e “(2)” Resíduo de pedra São Tomé.

$$Z(1,2) = 24,767 - 0,243x(2) + 1,397$$

(13)

5.5.1 Desempenho térmico dos pavers

5.5.1.1 Desempenho térmico dos pavers submetidos à luz artificial

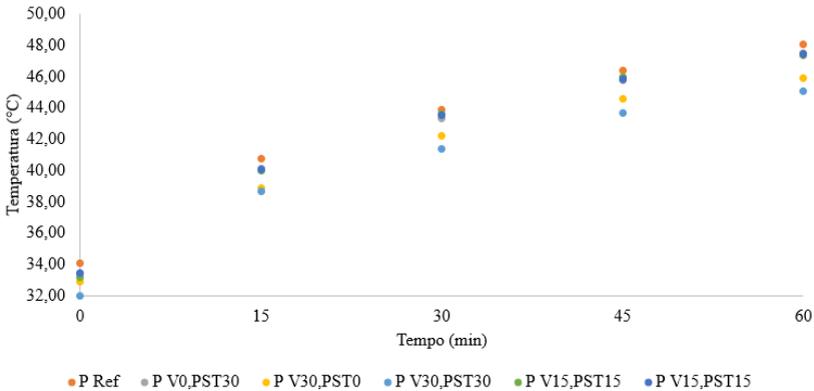
A Tabela 23 apresenta as médias de temperatura das medidas realizadas internamente sob radiação de luz artificial. Na sequência a Figura 44 apresenta por meio de gráfico os resultados da Tabela 23.

Tabela 23 - Média das temperaturas dos pavers submetidos à radiação artificial.

Tempo (min)	Temperatura dos pavers (°C)					
	P Ref	P V0, PST30	P V30, PST0	P V30, PST30	P V15, PST15	P V15, PST15
0	34,07	33,35	32,86	32,01	33,13	33,47
15	40,73	40,13	38,89	38,64	39,98	40,02
30	43,87	43,35	42,19	41,37	43,56	43,52
45	46,38	45,79	44,58	43,68	45,99	45,80
60	48,06	47,51	45,90	45,06	47,38	47,41

Fonte: Do autor (2022).

Figura 44 – Representação térmica dos pavers submetidos à radiação de luz artificial.

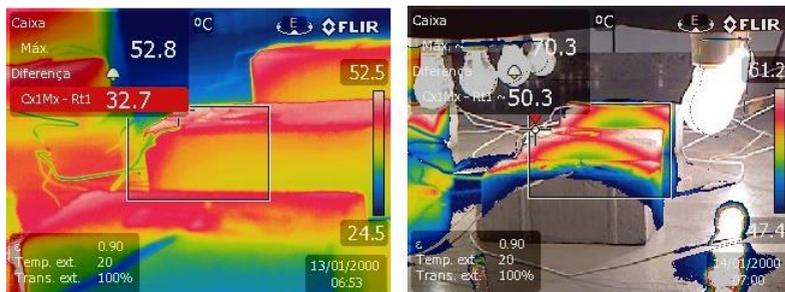


Fonte: Do autor (2022).

Analisando a Tabela 23 juntamente com a Figura 44 pode-se perceber que o paver P ref alcançou uma temperatura de 48,06°C. Já o paver P V30,PST30 alcançou uma temperatura de 45,06°C, seguido pelo P V30,PST0 alcançando 45,90°C, ou seja, uma redução na temperatura máxima de 6,25%. Um dos motivos que levaram à redução na absorção de calor é a menor condutividade térmica dos pavers com o aumento da porosidade (LI et al., 2022). A menor condutividade térmica sugere uma maior dificuldade para difusão do calor para o interior do corpo de prova, o que sugere uma menor temperatura do paver quando exposto ao calor. A Figura 45 apresenta imagens termográficas das amostras de pavers sob luz artificial. É possível notar que pavers apresentaram uma faixa de

temperatura mais elevada do que outros, indicando a facilidade na transmissão do calor com a alteração da composição do paver.

Figura 45 - Imagem termográfica de pavers submetidos à radiação artificial.



Fonte: Do autor (2022).

É possível perceber na Figura 45, que a radiação da luz artificial aumentou a temperatura dos pavers, alcançando temperaturas acima de 50,0°C como se observa no gradiente de cores da imagem da câmera termográfica.

5.5.1.2 Desempenho térmico dos pavers submetidos à luz solar

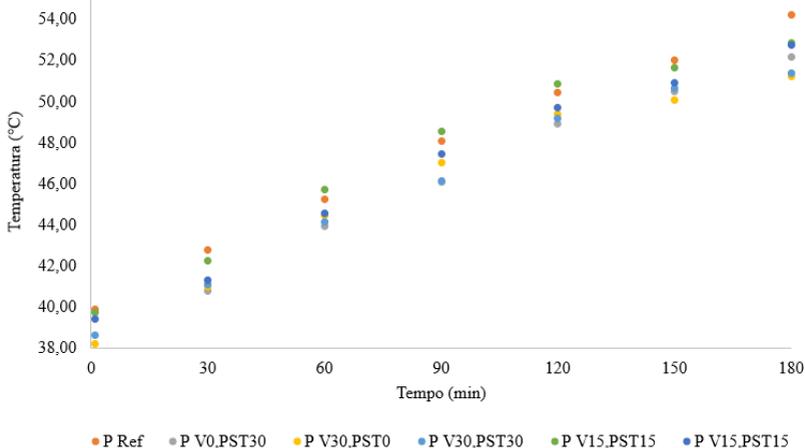
A Tabela 24 apresenta as médias de temperatura das medidas realizadas externamente sob radiação de luz solar. Na sequência a Figura 46 apresenta por meio de gráfico os resultados da Tabela 24.

Tabela 24 - Média das temperaturas dos pavers submetidos à radiação solar.

Tempo (min)	Temperatura dos pavers (°C)					
	P Ref	P V0, PST30	P V30, PST0	P V30, PST30	P V15, PST15	P V15, PST15
0	39,90	37,88	38,22	38,64	39,75	39,43
30	42,77	40,81	40,99	41,09	42,25	41,29
60	45,22	43,92	44,48	44,15	45,73	44,55
90	48,07	46,07	41,01	46,15	48,55	47,44
120	50,44	48,92	49,38	49,19	50,84	49,69
150	52,02	50,51	50,07	50,63	51,62	50,89
180	54,20	52,15	51,23	51,37	52,85	52,74

Fonte: Do autor (2022).

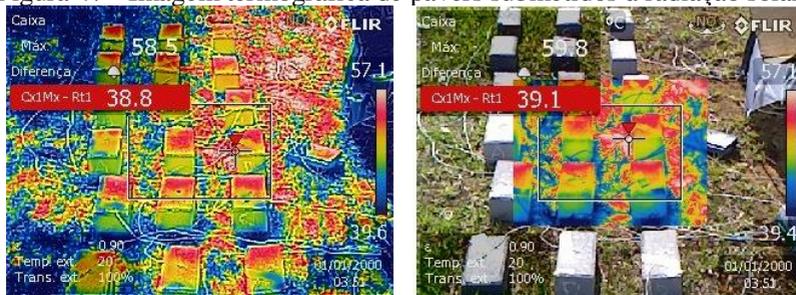
Figura 46 - Representação térmica dos pavers submetidos à radiação de luz solar.



Fonte: Do autor (2022).

Analisando a Tabela 24, pode-se perceber que paver com melhor desempenho na luz solar foi o P V30,PST0, e P V30,PST30 atingindo temperaturas de 51,23°C e 51,37°C respectivamente. O paver que apresentou a temperatura mais elevada foi o P ref chegando aos 54,20°C. Resultados esses que podem ser observados também na figura 47. Percebe-se que a diferença de temperatura entre os pavers com melhor e pior desempenho é de também aproximadamente 3°C. A Figura 47 apresenta imagens termográficas das amostras de pavers sob luz solar.

Figura 47 - Imagem termográfica de pavers submetidos à radiação solar.



Fonte: Do autor (2022).

É possível perceber na Figura 47, que a radiação da luz solar aumentou a temperatura dos pavers, alcançando temperaturas de 57,1°C como se observa no gradiente de cores da imagem da câmera termográfica.

5.5.1.3 Análise estatística dos resultados de absorção de calor dos pavers sob luz artificial

Os resultados obtidos do tratamento estatístico ANOVA para os resultados da absorção de calor nos pavers sob luz artificial são apresentados na Tabela 25.

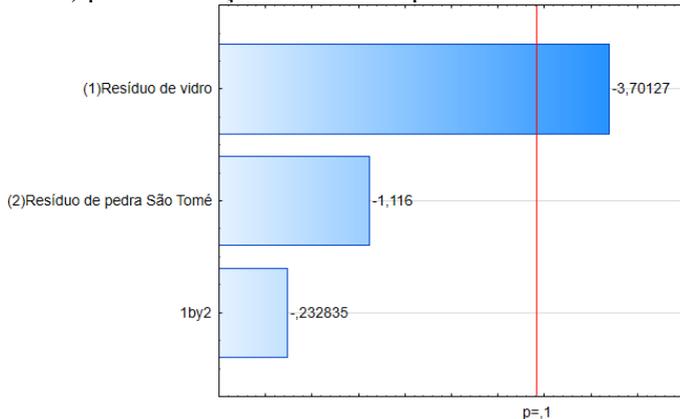
Tabela 25- Resultados do método ANOVA para a absorção de calor dos pavers sob luz artificial.

Fator	SS	df	MS	F	p
(1) Resíduo de vidro	5,313025	1	5,313025	13,69940	0,065866
(2) Resíduo de pedra São Tomé	0,483025	1	0,483025	1,24546	0,380521
1 de 2	0,021025	1	0,021025	0,05421	0,837548
Erro	0,775658	2	0,387829		
Total SS	6,592733	5			
R-quadrado = 0,88235					

Fonte: Do autor (2022).

Analizando a Tabela 25 percebe-se que o fator resíduo de vidro apresentou um valor p inferior a 0,10. Possibilitando tal fator apresentar uma melhor significância estatística. A Figura 48 apresenta o gráfico de Pareto dos três fatores buscando atingir os 90% de confiabilidade.

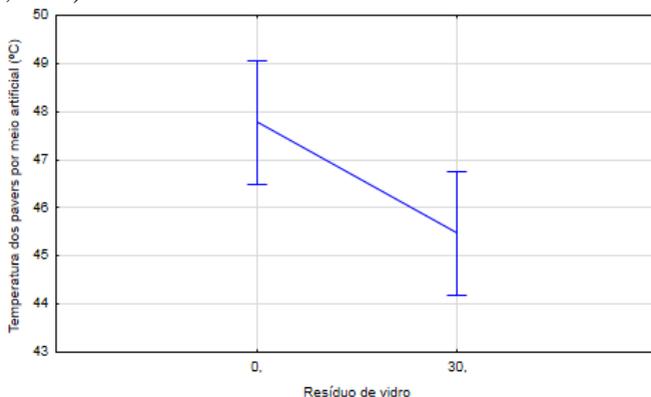
Figura 48 - Gráfico de Pareto dos fatores Resíduo de vidro, Resíduo de pedra São Tomé e 1 by 2 (Resíduo de vidro com Resíduo de pedra São Tomé) para a absorção de calor nos pavers sob luz artificial.



Fonte: Do autor (2022).

Analisando a Figura 48 percebe-se que o fator resíduo de vidro atingiu o nível de 90% de confiabilidade. A Figura 49 apresenta o gráfico de médias que representa a relação entre as médias dos resultados de absorção de calor por meio artificial dos pavers sem resíduos (P Ref) e com 30% de resíduo de vidro (P V30,PST0).

Figura 49 - Gráfico de médias de absorção de calor submetido à radiação artificial nos pavers sem resíduos (P Ref) e com 30% de resíduo de vidro (P V30,PST0).



Fonte: Do autor (2022).

Analisando a Figura 49 percebe-se a redução de temperatura dos pavers P V30,PST0 em relação ao paver P Ref, de forma que quanto maior a substituição de resíduo de vidro menor a absorção de calor nos pavers. A equação de regressão está descrita na Equação 14, onde “Z” representa a absorção de calor submetido a radiação artificial, “(1)” resíduo de vidro e “(2)” Resíduo de pedra São Tomé.

$$Z(1,2) = 48,314 - 0,072x(1) + 0,596 \quad (14)$$

5.5.1.4 Análise estatística dos resultados de absorção de calor dos pavers sob luz solar

Os resultados obtidos do tratamento estatístico ANOVA para os resultados da absorção de calor nos pavers sob luz solar são apresentados na Tabela 26.

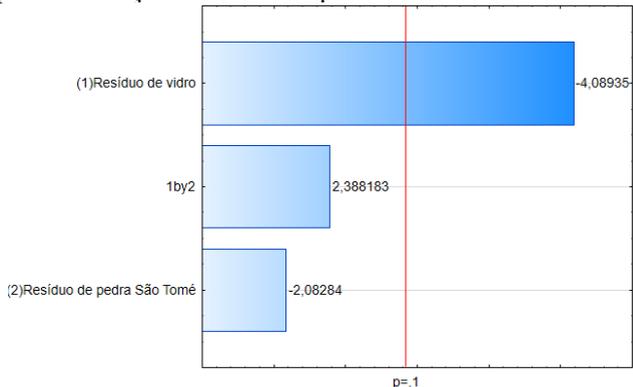
Tabela 26 - Resultados do método ANOVA para a absorção de calor dos pavers sob luz solar.

Fator	SS	df	MS	F	p
(1) Resíduo de vidro	3,515625	1	3,515625	16,72282	0,054919
(2) Resíduo de pedra São Tomé	0,912025	1	0,912025	4,33824	0,172682
1 de 2	1,199025	1	1,199025	5,70342	0,139550
Erro	0,420458	2	0,210229		
Total SS	6,047133	5			
R-quadrado = 0,93047					

Fonte: Do autor (2022).

Analisando a Tabela 26 percebe-se que o fator resíduo de vidro apresentou um valor p inferior a 0,10. Possibilitando tal fator apresentar uma melhor significância estatística. A Figura 50 apresenta o gráfico de Pareto dos três fatores buscando atingir os 90% de confiabilidade.

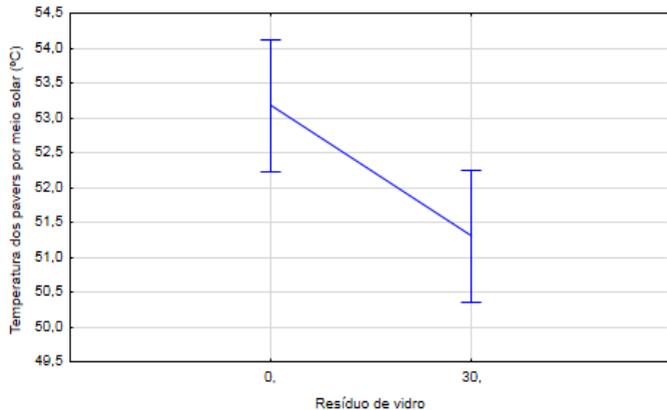
Figura 50 - Gráfico de Pareto dos fatores Resíduo de vidro, Resíduo de pedra São Tomé e 1 by 2 (Resíduo de vidro com Resíduo de pedra São Tomé) para a absorção de calor nos pavers sob luz solar.



Fonte: Do autor (2022).

Analisando a Figura 50 percebe-se que o fator resíduo de vidro atingiu o nível de 90% de confiabilidade. A Figura 51 apresenta o gráfico de médias que representa a relação entre as médias dos resultados de absorção de calor submetido à radiação solar nos pavers sem resíduos (P Ref) e com 30% de resíduo de vidro (P V30,PST0).

Figura 51 - Gráfico de médias de absorção de calor submetidos à radiação solar dos pavers sem resíduos (P Ref) e com 30% de resíduo de vidro (P V30,PST0).



Fonte: Do autor (2022).

Analisando a Figura 51 percebe-se a redução de temperatura dos pavers P V30,PST0 em relação ao paver P Ref, de forma que quanto maior a substituição de resíduo de vidro menor a absorção de calor nos pavers. A equação de regressão está descrita na Equação 15, onde “Z” representa a absorção de calor submetido a radiação solar “(1)” resíduo de vidro e “(2)” Resíduo de pedra São Tomé.

$$Z(1,2) = 54,385 - 0,099x(1) + 0,439$$

(15)

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi investigado o comportamento do vidro laminado e a pedra São Tomé na composição de pavers com o objetivo de examinar seu desempenho térmico no espaço aberto com exposição à luz solar e à luz artificial.

Os resultados de caracterização química dos resíduos de vidro e pedra São Tomé apresentaram 71,90% e 86,09% de SiO_2 , respectivamente. Posteriormente ao processo de cominuição, a análise granulométrica do resíduo de vidro indicou um módulo de finura de 2,87. Já para o resíduo de pedra São Tomé, o módulo de finura foi de 3,03. Assim, o processo de moagem potencializou a utilização dos resíduos na composição de *pavers*.

O P V30,PST0 apresentou melhor resultado de absorção térmica solar dos pavers, este obteve uma redução de 5,5% da temperatura. O P V30,PST0; P V30,PST30 e P V0,PST30 foram 3 °C, 2,8 °C e 2,0 °C mais frios que o paver referência, respectivamente. O resíduo de vidro que substituiu parcialmente os agregados miúdos, absorveu menos calor nos pavers. Já na medição por meio artificial o paver P V30,PST30 obteve uma redução 6,25% na temperatura.

O traço padrão apresentou uma maior resistência mecânica e o traço P V30,PST0 apresentando 85% da resistência do paver referência. Observou-se redução da resistência mecânica com as substituições de resíduo de vidro e resíduo da pedra São Tomé. Conforme observado na análise de absorção de água e índice de vazios, o resíduo de pedra São Tomé possui uma maior absorção de água e pode ser a razão por trás dessa redução de resistência. O vidro por estar com sua granulometria na zona ótima promoveu o preenchimento de espaços vazios, reduzindo conseqüentemente a porosidade contribuindo para o aumento da resistência dos pavers em comparação as demais composições. No entanto, é necessário ajustar o traço referência e as quantidades de substituições de resíduos.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados alcançados com esta pesquisa, sugere-se os seguintes temas para trabalhos futuros:

- Substituir o traço referência para que alcance a resistência mínima de compressão 35MPa
- Utilizar pigmentos na confecção dos pavers para analisar e comparar sua absorção e refletância;
- Empregar outros resíduos e avaliar o comportamento térmico e mecânico dos pavers.

REFERÊNCIAS

ALECRIM, Adson Viana. **Estudo do resíduo de quartzito foliado para emprego em estruturas de pavimentos**. 2009. 171 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica, São Paulo, 2009. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-08092010-124250/pt-br.php>. Acesso em: 12 dez. 2022;

AMORIM, Margarete Cristiane de Costa Trindade et al.. Day and night surface and atmospheric heat islands in a continental and temperate tropical environment. **Urban Climate**. São Paulo, v.38, pp.100918, jul 2021;

ARABI, Nourredine et al.. Valorization of recycled materials in development of self-compacting concrete: Mixing recycled concrete aggregates – Windshield waste glass aggregates. **Construction and Building Materials**. Argélia, v.209, p. 364-376, mar 2019;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9781**: Peças de concreto para pavimentação – Especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2013. 4 p.;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento - Procedimentos. Rio de Janeiro, 2015. 23 p.;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009. 11 p.;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.;

AKBARI, Hashem et al.. Peak power and cooling energy savings of high-albedo roofs. **Energy and Buildings**. Estados Unidos. vol. 25, p. 117-126, 1997;

AWOYERA, Paul O., et al. Water absorption, strength and microscale properties of interlocking concrete blocks made with plastic fibre and ceramic aggregates. **Case Studies in Construction Materials**. vol. 15, pp. e00677, dez. 2021

AZZALI, N. et al. Spectral emittance of ceramics for high temperature solar receivers. **Solar Energy**. Itália. vol. 222, p. 74-83, jul 2021;

BALAN, L. Anjali; ANUPAM, B.R.; SHARMA, Sunil. Thermal and mechanical performance of cool concrete pavements containing waste glass. **Construction and Building Materials**. India, vol. 290, pp.123238, abr 2021;

BARBOSA, Michele Cristina Rufino. **Avaliação sistêmica de tecnologias aplicáveis ao APL Lagoa Santa**. Ouro Preto. 121p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, 2008;

CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G.. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. 10. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2021. 701 p. Tradução de Sérgio Murilo Stamile Soares, Luiz Claudio de Queiroz Faria; revisão técnica Wagner Anacleto Pinheiro;

CASTRO, Luiz Cesar de. **Estudo e desenvolvimento de materiais 'frios' para pavimentação urbana**. 2015. 78 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Criciúma, 2015;

CEBALLOS, J. C. **Estimativa de radiação solar à superfície com céu claro: um modelo simplificado**. Revista Brasileira de Meteorologia. Vol. 15, p.113-122, 2000;

COURA, Jean Cota; PROFETI, Demetrius; PROFETI Luciene Paula Roberto. Eco-friendly chitosan/quartzite composite as adsorbent for dye removal. **Materials Chemistry and Physics**. Brasil, vol. 256, pp. 123711, dez 2020;

CRUZ, Talita. **Ilhas de Calor: Saiba o Que São e Como Reduzir Seus Impactos – curiosidades**, (01 out. 2021). Disponível em : <https://www.vivadecora.com.br/pro/curiosidades/ilhas-de-calor/>. Acessado em: 20 out. 2021;

DANTAS, Sérgio Roberto Andrade; VITTORINO, Fúlvio; LOH, Kai. Comparison of reflectance to solar radiation between mortars treated with TiO₂ and painted mortars after three years of exposure. **Journal of Building Engineering**. São Paulo, vol.46, pp.103829, abr 2022;

DIAS, Lilian Lima et al. Desenvolvimento de um novo produto cerâmico para pavimentação de passeios e áreas públicas. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, vol. 16, n. 4, p. 155-165, out./dez. 2016;

DONG, Wenkui; LI, Wengui; TAO, Zhong. A comprehensive review on performance of cementitious and geopolymeric concretes with recycled waste glass as powder, sand or cullet. **Resources, Conservation and Recycling**. Australia, vol. 172, pp. 105664, set. 2021;

DORNELES, Kelen Almeida; RORIZ, Maurício. **Influência das tintas imobiliárias sobre o desempenho térmico e energético de 75 edificações**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - UNICAMP, Campinas-SP, 2007;

FERDOUS, Wahid et al. Recycling of landfill wastes (tyres, plastics and glass) in construction – A review on global waste generation, performance, application and future opportunities. **Resources, Conservation and Recycling**. Australia, vol. 173, pp. 105745, out. 2021;

GAGO, E.J.; J. Roldan, R. Pacheco-Torres, J. Ordóñez. **The city and urban heat islands: A review of strategies to mitigate adverse effects**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013.;

GLEIZE, P. et al. Efeitos do ar incorporado nas propriedades do estado endurecido em argamassas de cimento e areia. 51º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, Curitiba. **Anais do 51º Congresso Brasileiro do Concreto**. Curitiba: IBRACON, 2009. p. 10-14;

GODINHO, J. P. et al. Factors influencing ultrasonic pulse velocity in concrete. **IBRACON Structures and Materials Journal**. Brasil, vol 13, p. 222 – 247, Abr 2020;

GUO, Pengwei et al. New perspectives on recycling waste glass in manufacturing concrete for sustainable civil infrastructure. **Construction and Building Materials**. China, vol. 257, 119579, out 2020;

HARDER, Joachim. **Glass recycling – Current market trends - recovery**, (2018). Disponível em: https://www.recovery-worldwide.com/en/artikel/glass-recycling-current-market-trends_3248774.html. Acessado em: 09 set. 2021;

HIGUCHI, Adma Magni Darwich et al.. Use of glass powder residue as an eco-efficient supplementary cementitious material. **Construction and Building Materials**. Amazonas, vol. 304, pp.124640, out 2021;

IGLESIAS, A. et al. Numerical-probabilistic assessment of tempered glass failure based on the generalised local model characterised by annealed plates. *Engineering Fracture Mechanics*. Espanha, vol. 274, pp. 108754, 2022;

IZZO, Francesco et al. External reflectance FTIR dataset (4000–400 cm⁻¹) for the identification of relevant mineralogical phases forming Cultural Heritage materials. **Infrared Physics & Technology**. Italia, vol. 106, pp. 103266, 2020;

JOSÉ, Anu et al. Characterization of cement stabilized pond ash using FTIR spectroscopy. **Construction and Building Materials**. India, vol. 263, pp. 120136, dez 2020;

JOSHUI, Mitali Yeshwant et al. Identifying urban morphological archetypes for microclimate studies using a clustering approach. **Building and Environment**. Belgium, v. 224, pp. 109574, 2022;

KIM, Se Woong, BROWN, Robert D.. Urban heat island (UHI) variations within a city boundary: A systematic literature review.

Renewable and Sustainable Energy Reviews. Texas, vol. 148, pp.111256, set 2021;

KUPWADE-PATIL, Kunal et al. Use of silica fume and natural volcanic ash as a replacement to Portland cement: Micro and pore structural investigation using NMR, XRD, FTIR and X-ray microtomography. **Construction and Building Materials.** Estados Unidos, vol. 158, p. 574-590, 2018;

LI, Xiang et al. Preparation of high closed porosity foamed ceramics from coal gangue waste for thermal insulation applications. **Ceramics International.** China, vol. 48, pag. 37055-37063, dez 2022

MAIA, E. V. S.; GRANJA, M.I.P.; FRANCKLIN JUNIOR, I. **Determinação dos módulos estáticos de deformação e elasticidade em concretos produzidos com rejeitos de quartzitos do sudoeste mineiro.** In: Seminário de Iniciação Científica e Extensão da UEMG, 2010, Frutal-MG. Seminário de Iniciação Científica e Extensão da UEMG, 2010;

MEHTA, Provindar Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais.** São Paulo: PINI, 2008.

NOBRE, Thiago Ricardo Santos. Reidratação de pastas de cimento portland desidratadas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO, 7., 2015, São Paulo. **Anais [...]** . São Paulo: Cbci, 2016. p. 1-17.

OLIVEIRA, Andrielli Morais de et al. Study of the development of hydration of ternary cement pastes using X-ray computed microtomography, XRD-Rietveld method, TG/DTG, DSC, calorimetry and FTIR techniques. **Journal of Building Engineering.** Brasil, vol.64, pp. 105616, abr. 2023;

ORTEGA, Sebastião Gerson. **Sustentabilidade na construção civil: significados, práticas e ideologia.** Organizações e Sustentabilidade, Londrina, vol. 2, n. 1, p. 112-137, jan./jun. 2014;

PASSUELO, Alexandra et al. **CONCRETO: CIÊNCIA E TECNOLOGIA.** 1. ed. São Paulo: Geraldo C. Isaia, 2011;

PEDREIRÃO. **Assentamento de Piso Intertravado: Passo a Passo** 25 mar. 2014. Disponível em: <<http://pedreira.com.br/areas-externas/assentamento-de-piso-intertravado-passo-a-passo/>>. Acesso em: 09 dez. 2022;

QUEIROZ, C. de A.; MELO, A. B. de. CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS DA PEDRA RECONSTITUÍDA COM RESÍDUOS DA EXTRAÇÃO DE QUARTZITO PARA APLICAÇÃO EM REVESTIMENTO DE FACHADAS DE EDIFÍCIOS [Characterization of the thermal properties of reconstituted stone with the quartzite extraction waste for use in the coating of building facades]. **REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, [S. l.], v. 15, n. 1, 2018. DOI: 10.5216/reec.v15i1.51039. Disponível em: <https://www.revistas.ufg.br/reec/article/view/51039>. Acesso em: 13 jan. 2022;

RAUPP - PEREIRA, Fabiano. **Valorização de resíduos industriais como fonte alternativa mineral: composições cerâmicas e cimentícias**. Tese (Doutorado) - Departamento de Ciência e Engenharia de Materiais. 267 f. Universidade de Aveiro. Aveiro, 2006;

ROSHANA, Gholamreza; SARLI, Reza; GRAB, Stefan W.. The case of Tehran's urban heat island, Iran: Impacts of urban 'lockdown' associated with the COVID-19 pandemic. **Sustainable Cities and Society**. Iran, vol.75, pp.103263, dez 2021;

ROQUE, Rodrigo Alexander Lombardi; PIERRI, Alexandre Coan. Uso inteligente de recursos naturais e sustentabilidade na construção civil. **Research, Society and Development**. Universidade Federal de Itajubá, Brasil, vol. 8. pag.1-18, nov. 2018;

SALIH, Moslih Amer et al. Effect of elevated temperatures on mechanical and microstructural properties of alkali-activated mortar made up of POFA and GGBS. **Construction and Building Materials**. Iraque, vol. 328, pp. 127041, abr 2022;

SANTAMOURIS, M., A. Synnefa, T. Karlessi. Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions. Available online at, 2011;

SHAMSAEI, Mohsen; CARTER, Alan; VAILLANCOURT, Michel. A review on the heat transfer in asphalt pavements and urban heat island mitigation methods. **Construction and Building Materials**. vol. 359, pp. 129350, dez. 2022;

SILVA, GV da; BORGES, SPT; BARAÑANO, AG Propriedades físicas, químicas e mecânicas de cimentos tipo CPI e CPV obtidos com diferentes proporções de clínquer com carga de cal. **Investigação, Sociedade e Desenvolvimento**, [S. l.], v. 10, n. 13, pág. e309101321272, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i13.21272. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/21272>. Acesso em: 23 jan. 2023.

SONG, Wenhao et al. Study of water absorption and corrosion resistance of the mortar with waste marble powder. **Construction and Building Materials**. China, vol 345, pp.128235, ago 2022;

SOUZA-DAL BÓ, Glaucia Cardoso de; DAL BÓ, Marcelo; BERNARDIN, Adriano Michael. Reuse of laminated glass waste in the manufacture of ceramic frits and glazes. **Materials Chemistry and Physics**. Brasil, vol. 257, pp. 123847, 2021;

SOUZA, Armando C.; PEREIRA, Mayara F.; MOSSIN, Luiz C.. Thermal and mechanical characterization of blindex glass powder residue® for the production of ecological coating. **Journal of Materials Research and Technology**. Campo Grande, vol.12, p. 1794-1803, jun 2021;

SWAIN, Basudev; RYANG, Parque Jae; LEE, Chan Gi. Industrial recycling of end-of-life vehicle windshield glass by mechanical beneficiation and complete recovery of polyvinyl butyral. **Journal of Cleaner Production**. República da Coréia, vol. 334, pp.130192, fev. 2022;

TAMILARASI, A. et al. Data on minerals and crystallinity index of quartz in rock samples collected from Paleolithic archaeological site of Attirampakkam, Tamil Nadu. **Data in Brief**. India, vol. 39, pp. 107571, nov. 2021;

TIAN, Liu et al. Temporal characteristics of urban heat island and its response to heat waves and energy consumption in the mountainous Chongqing, China. **Sustainable Cities and Society**. China, vol.75, pp.103260, ago. 2021;

VITA, Gerlando et al. Petrographic characterization of quartzite tools from the Palaeolithic site of San Teodoro cave (Sicily): Study on the provenance of lithic raw materials. **Journal of Archaeological Science: Reports**. Italia, vol.45, pp. 103593, 2022;

ZHANG, Hongliang et al. Hydroxylation structure of quartz surface and its molecular hydrophobicity. **Applied Surface Science**. China, vol. 612, pp. 155884, 2023;

ZHANG, T. et al. Investigation of infrared spectral emissivity of low emittance functional coating artefacts. **Infrared Physics & Technology**. China, vol.110, pp.103454, nov. 2020;

APÊNDICES

APÊNDICE A - Tabela de absorção de água das amostras

Experimento*	m (g)	m _s (g)	A (%)	Média (%)	Desvio Padrão (%)
P1 _{ref}	3386,1	3197,2	5,91		
P2 _{ref}	3316,5	3108,8	6,67	6,27	0,31
P3 _{ref}	3253,4	3062,5	6,23		
P1 _{V0, PST30}	3051,2	2878,2	6,01		
P2 _{V0, PST30}	3288,7	3124,6	5,25	5,81	0,40
P3 _{V0, PST30}	3144,5	2962,0	6,16		
P1 _{V30, PST0}	3294,5	3118,6	5,64		
P2 _{V30, PST0}	3355,7	3166,1	5,99	5,84	0,15
P3 _{V30, PST0}	3259,4	3077,8	5,90		
P1 _{V30, PST30}	3300,7	3054,3	8,07		
P2 _{V30, PST30}	3235,0	2993,1	8,08	8,06	0,02
P3 _{V30, PST30}	3075,2	2846,6	8,03		
P1 _{V15, PST15 (1)}	3190,3	2941,7	8,45		
P2 _{V15, PST15 (1)}	3255,6	3032,9	7,34	6,11	0,46
P3 _{V15, PST15 (1)}	3300,9	3056,2	8,01		
P1 _{V15, PST15 (2)}	3259,1	3079,4	5,84		
P2 _{V15, PST15 (2)}	3219,3	3028,8	6,29	6,20	0,27
P3 _{V15, PST15 (2)}	3373,5	3168,4	6,47		

*Nota referente à nomenclatura adotada: Exemplo – P1_{V0, PST30}: correspondente ao Paver P, do traço do corpo de prova V0, PST30 do experimento 1.

Ref. Representa as amostras referências.

Fonte: Do autor, 2022.

APÊNDICE B - Tabela de índice de vazios das amostras

Experimento*	M_{sat} (g)	m_s (g)	M_i (g)	I_v (%)	Média (%)	Desvio Padrão (%)
P1 _{ref}	3499,3	3194,2	1972,9	19,99		
P2 _{ref}	3438,3	3106,4	1924,1	21,92	21,18	0,85
P3 _{ref}	3384,3	3060,7	1889,3	21,65		
P1 _{V0, PST30}	3218,8	2876,5	1730,1	22,99		
P2 _{V0, PST30}	3503,1	3121,2	1910,7	23,98	24,07	0,92
P3 _{V0, PST30}	3338,6	2950,6	1801,6	25,24		
P1 _{V30, PST0}	3406,2	3115,6	1871,1	18,93		
P2 _{V30, PST0}	3467,4	3159,0	1908,9	19,79	19,50	0,40
P3 _{V30, PST0}	3376,0	3073,4	1847,0	19,79		
P1 _{V30, PST30}	3451,1	3053,2	1875,7	25,26		
P2 _{V30, PST30}	3391,5	2992,1	1842,8	25,79	25,71	0,34
P3 _{V30, PST30}	3232,4	2845,6	1749,4	26,08		
P1 _{V15, PST15 (1)}	3304,3	2939,8	1806,9	24,34		
P2 _{V15, PST15 (1)}	3397,1	3030,9	1860,2	23,83	24,21	0,28
P3 _{V15, PST15 (1)}	3433,8	3054,3	1883,1	24,47		
P1 _{V15, PST15 (2)}	3417,1	3077,3	1872,7	22,00		
P2 _{V15, PST15 (2)}	3363,2	3026,3	1842,2	22,15	21,96	0,17
P3 _{V15, PST15 (2)}	3506,6	3166,1	1940,3	21,74		

*Nota referente à nomenclatura adotada: Exemplo – P1_{V0, PST30}: correspondente ao Paver P, do traço do corpo de prova V0, PST30 do experimento 1.

Ref. Representa as amostras referências.

Fonte: Do autor, 2022.

APÊNDICE C - Tabela de massa específica das amostras

Experimento*	M_{sat} (g)	m_s (g)	M_i (g)	ρ_s (%)	Média (%)	Desvio Padrão (%)
P1 _{ref}	3499,3	3194,2	1972,9	2,09		
P2 _{ref}	3438,3	3106,4	1924,1	2,05	2,06	0,02
P3 _{ref}	3384,3	3060,7	1889,3	2,05		
P1 _{V0, PST30}	3218,8	2876,5	1730,1	1,93		
P2 _{V0, PST30}	3503,1	3121,2	1910,7	1,96	1,94	0,02
P3 _{V0, PST30}	3338,6	2950,6	1801,6	1,92		
P1 _{V30, PST0}	3406,2	3115,6	1871,1	2,03		
P2 _{V30, PST0}	3467,4	3159,0	1908,9	2,03	2,02	0,01
P3 _{V30, PST0}	3376,0	3073,4	1847,0	2,01		
P1 _{V30, PST30}	3451,1	3053,2	1875,7	1,94		
P2 _{V30, PST30}	3391,5	2992,1	1842,8	1,93	1,93	0,01
P3 _{V30, PST30}	3232,4	2845,6	1749,4	1,92		
P1 _{V15, PST15 (1)}	3304,3	2939,8	1806,9	1,96		
P2 _{V15, PST15 (1)}	3397,1	3030,9	1860,2	1,97	1,97	0,00
P3 _{V15, PST15 (1)}	3433,8	3054,3	1883,1	1,97		
P1 _{V15, PST15 (2)}	3417,1	3077,3	1872,7	1,99		
P2 _{V15, PST15 (2)}	3363,2	3026,3	1842,2	1,99	2,0	0,01
P3 _{V15, PST15 (2)}	3506,6	3166,1	1940,3	2,02		

*Nota referente à nomenclatura adotada: Exemplo – P1_{V0, PST30}: correspondente ao Paver P, do traço do corpo de prova V0, PST30 do experimento 1.

Ref. Representa as amostras referências.

Fonte: Do autor, 2022.

APÊNDICE D - Tabela de resistência à compressão aos 7 dias das amostras

Experimento*	P (N)	f_{pi} (MPa)	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	$F_{pk,est}$ (MPa)
P1 _{ref}	105.969	21,6	19,5	1,70	17,9
P2 _{ref}	106.100	21,6			
P3 _{ref}	94.093	19,2			
P4 _{ref}	88.482	18,1			
P5 _{ref}	91.875	18,7			
P6 _{ref}	87.438	17,8			
P1 _{v0, PST30}	87.438	15,9	15,2	0,90	14,4
P2 _{v0, PST30}	67.471	13,8			
P3 _{v0, PST30}	77.389	15,8			
P4 _{v0, PST30}	76.084	15,5			
P5 _{v0, PST30}	69.950	14,3			
P6 _{v0, PST30}	77.650	15,8			
P1 _{v30, PST0}	94.354	19,2	17,9	0,98	17,0
P2 _{v30, PST0}	92.658	18,9			
P3 _{v30, PST0}	83.914	17,1			
P4 _{v30, PST0}	83.522	17,0			
P5 _{v30, PST0}	84.045	17,1			
P6 _{v30, PST0}	88.743	18,1			
P1 _{v30, PST30}	72.430	14,8	15,1	0,71	14,4
P2 _{v30, PST30}	76.084	15,5			
P3 _{v30, PST30}	76.867	15,7			
P4 _{v30, PST30}	77.389	15,8			
P5 _{v30, PST30}	70.211	14,3			
P6 _{v30, PST30}	69.689	14,2			
P1 _{v15, PST15 (1)}	78.172	15,9	16,6	0,80	15,8
P2 _{v15, PST15 (1)}	83.522	17,0			
P3 _{v15, PST15 (1)}	78.302	16,0			
P4 _{v15, PST15 (1)}	81.565	16,6			
P5 _{v15, PST15 (1)}	78.041	15,9			
P6 _{v15, PST15 (1)}	87.829	17,9			

Experimento*	P (N)	f_{pi} (MPa)	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	$F_{pk,est}$ (MPa)
P1 V15, PST15 (2)	87.829	15,0			
P2 V15, PST15 (2)	73.343	15,0			
P3 V15, PST15 (2)	74.126	15,1	15,0	0,10	14,9
P4 V15, PST15 (2)	72.430	14,8			
P5 V15, PST15 (2)	72.821	14,9			
P6 V15, PST15 (2)	73.343	15,0			

*Nota referente à nomenclatura adotada: Exemplo – P1 V0, PST30: correspondente ao Paver P, do traço do corpo de prova V0, PST30 do experimento 1. Ref. Representa as amostras referências.

Fonte: Do autor, 2022.

APÊNDICE E - Tabela de resistência à compressão aos 21 dias das amostras

Experimento*	P (N)	f_{pi} (MPa)	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	$F_{pk,est}$ (MPa)
P1 _{ref}	141.336	28,8	25,5	1,86	23,8
P2 _{ref}	129.329	26,4			
P3 _{ref}	116.931	23,9			
P4 _{ref}	119.150	24,3			
P5 _{ref}	119.150	24,3			
P6 _{ref}	122.804	25,1			
P1 _{v0, PST30}	82.870	16,9	17,8	1,12	16,7
P2 _{v0, PST30}	91.744	18,7			
P3 _{v0, PST30}	83.784	17,1			
P4 _{v0, PST30}	85.350	17,4			
P5 _{v0, PST30}	82.739	16,9			
P6 _{v0, PST30}	96.181	19,6			
P1 _{v30, PST0}	99.444	20,3	22,1	1,06	21,1
P2 _{v30, PST0}	105.317	21,5			
P3 _{v30, PST0}	110.145	22,5			
P4 _{v30, PST0}	108.449	22,1			
P5 _{v30, PST0}	110.145	22,5			
P6 _{v30, PST0}	114.713	23,4			
P1 _{v30, PST30}	81.173	16,6	15,9	0,82	15,1
P2 _{v30, PST30}	72.038	14,7			
P3 _{v30, PST30}	80.260	16,4			
P4 _{v30, PST30}	79.477	16,2			
P5 _{v30, PST30}	73.604	15,0			
P6 _{v30, PST30}	80.260	16,4			
P1 _{v15, PST15 (1)}	104.664	21,4	20,2	0,92	19,3
P2 _{v15, PST15 (1)}	101.793	20,8			
P3 _{v15, PST15 (1)}	101.402	20,7			
P4 _{v15, PST15 (1)}	95.137	19,4			
P5 _{v15, PST15 (1)}	93.571	19,1			
P6 _{v15, PST15 (1)}	95.920	19,6			

Experimento*	P (N)	f_{pi} (MPa)	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	$F_{pk,est}$ (MPa)
P1 v_{15} , PST15 (2)	105.317	21,5			
P2 v_{15} , PST15 (2)	99.705	20,3			
P3 v_{15} , PST15 (2)	102.054	20,8	20,2	0,81	19,5
P4 v_{15} , PST15 (2)	96.181	19,6			
P5 v_{15} , PST15 (2)	96.703	19,7			
P6 v_{15} , PST15 (2)	94.876	19,4			

*Nota referente à nomenclatura adotada: Exemplo – P1 v_0 , PST30: correspondente ao Paver P, do traço do corpo de prova V0, PST30 do experimento 1. Ref. Representa as amostras referências.

Fonte: Do autor, 2022.

APÊNDICE F - Tabela de resistência à compressão aos 28 dias das amostras

Experimento*	P (N)	f_{pi} (MPa)	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	$F_{pk,est}$ (MPa)
P1 _{ref}	134.028	27,3	26,6	1,38	25,3
P2 _{ref}	123.979	25,3			
P3 _{ref}	127.372	26,0			
P4 _{ref}	129.982	26,5			
P5 _{ref}	124.892	25,5			
P6 _{ref}	141.988	29,0			
P1 _{v0, PST30}	91.744	18,7	19,5	1,63	18,0
P2 _{v0, PST30}	99.835	20,4			
P3 _{v0, PST30}	99.574	20,3			
P4 _{v0, PST30}	88.612	18,1			
P5 _{v0, PST30}	106.622	21,8			
P6 _{v0, PST30}	86.002	17,5			
P1 _{v30, PST0}	116.670	23,8	22,5	2,00	20,6
P2 _{v30, PST0}	118.889	24,3			
P3 _{v30, PST0}	120.716	24,6			
P4 _{v30, PST0}	105.839	21,6			
P5 _{v30, PST0}	98.530	20,1			
P6 _{v30, PST0}	100.357	20,5			
P1 _{v30, PST30}	95.920	19,6	17,7	1,49	16,3
P2 _{v30, PST30}	83.261	17,0			
P3 _{v30, PST30}	86.002	17,5			
P4 _{v30, PST30}	84.175	17,2			
P5 _{v30, PST30}	93.702	19,1			
P6 _{v30, PST30}	76.084	15,5			
P1 _{v15, PST15 (1)}	113.016	23,1	20,6	1,70	19,1
P2 _{v15, PST15 (1)}	105.447	21,5			
P3 _{v15, PST15 (1)}	92.005	18,8			
P4 _{v15, PST15 (1)}	98.661	20,1			
P5 _{v15, PST15 (1)}	92.136	18,8			
P6 _{v15, PST15 (1)}	104.925	21,4			

Experimento*	P (N)	f_{pi} (MPa)	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	$F_{pk,est}$ (MPa)
P1 v_{15} , PST15 (2)	104.925	22,6			
P2 v_{15} , PST15 (2)	91.092	18,6			
P3 v_{15} , PST15 (2)	93.963	19,2	19,5	1,85	17,8
P4 v_{15} , PST15 (2)	92.919	19,0			
P5 v_{15} , PST15 (2)	83.653	17,1			
P6 v_{15} , PST15 (2)	99.313	20,3			

*Nota referente à nomenclatura adotada: Exemplo – P1 v_0 , PST30: correspondente ao Paver P, do traço do corpo de prova V0, PST30 do experimento 1. Ref. Representa as amostras referências.

Fonte: Do autor, 2022.