



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO
DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

SHERINGTON AUGUSTO MILANI BIGOTTO

**ESTUDO DE TRAÇOS DE CONCRETO PERMEÁVEL COM ADIÇÃO
DE AREIA E SÍLICA**

Ilha Solteira

2021

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

SHERINGTON AUGUSTO MILANI BIGOTTO

**ESTUDO DE TRAÇOS DE CONCRETO PERMEÁVEL COM ADIÇÃO
DE AREIA E SÍLICA**

Dissertação apresentada à
Faculdade de Engenharia de Ilha
Solteira – UNESP como parte dos
requisitos para a obtenção do título
de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof. Dra. Maria da
Consolação Fonseca de
Albuquerque

Ilha Solteira

2021

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

B594e Bigotto, Sherington Augusto Milani.
Estudo de traços de concreto permeável com adição de areia e sílica /
Sherington Augusto Milani Bigotto. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2018
109 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de
Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Estruturas, 2018

Orientador: Maria da Consolação Fonseca de Albuquerque
Inclui bibliografia

1. Concreto permeável. 2. Dosagem. 3. Resistência mecânica. 4.
Permeabilidade.

Rajane da Silva Santos
Rajane da Silva Santos

Supervisora Técnica de Seção
Serviço Técnico de Biblioteca, Arquivamento de Origem e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação
CRB3-9009


CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: ESTUDO DE TRAÇOS DE CONCRETO PERMEÁVEL COM ADIÇÃO DE AREIA E SÍLICA

AUTOR: SHERINGTON AUGUSTO MILANI BIGOTTO

ORIENTADORA: MARIA DA CONSOLAÇÃO FONSECA DE ALBUQUERQUE

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em ENGENHARIA CIVIL,
área: Estruturas pela Comissão Examinadora:

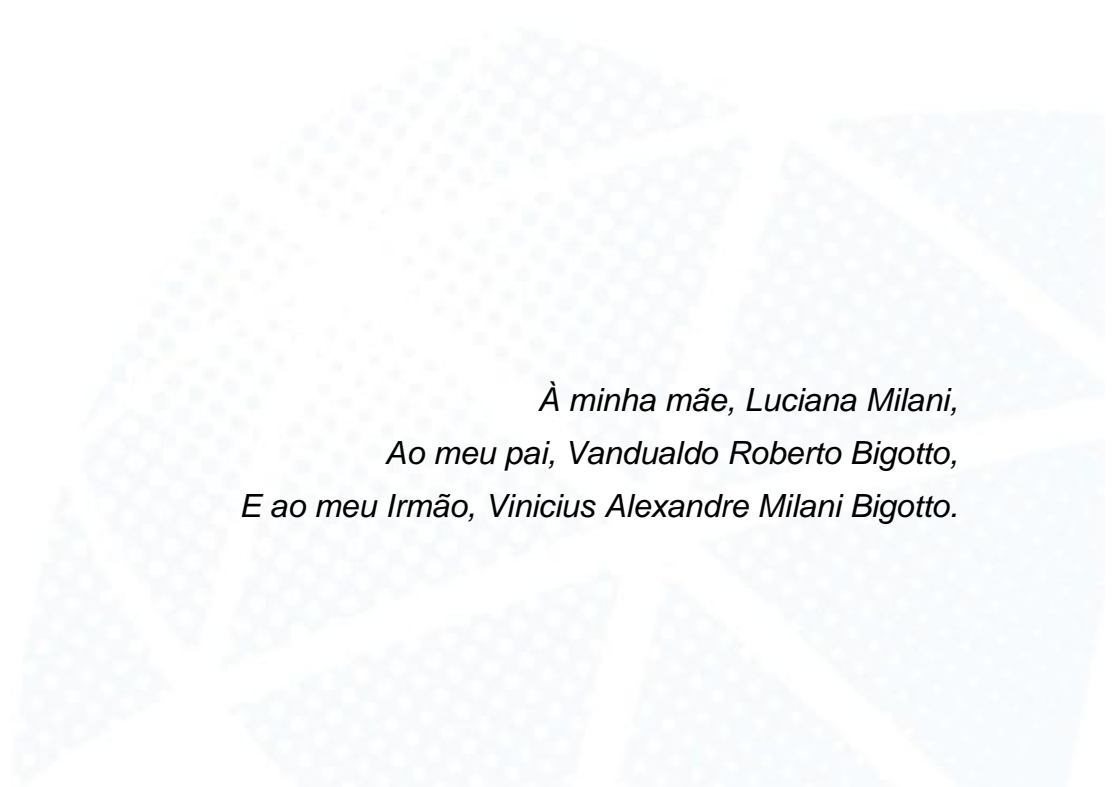


Profa. Dra. MARIA DA CONSOLAÇÃO FONSECA DE ALBUQUERQUE (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Prof. Dr. MAURO MITSUUCHI TASHIMA (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Prof. Dr. JOSÉ TADEU BALBO (Participação Virtual)
Departamento de Infraestrutura de Transportes / Universidade de São Paulo - USP

Ilha Solteira, 30 de julho de 2021



*À minha mãe, Luciana Milani,
Ao meu pai, Vandualdo Roberto Bigotto,
E ao meu Irmão, Vinicius Alexandre Milani Bigotto.*

AGRADECIMENTOS

No encerramento desta etapa da minha vida gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos a todas as pessoas que, de alguma forma, me ajudaram nesse caminho, em especial:

Aos meus pais, Luciana Milani e Vandualdo Bigotto, que me apoiaram e incentivaram em todas as escolhas tomadas e por sempre me oferecerem o suporte necessário.

Ao meu irmão, Vinicius Bigotto, por ser meu amigo e grande companheiro em todas as aventuras que vivi.

À minha namorada e melhor amiga, Laís Amolaro, por todo apoio, incentivo, compreensão e carinho em todos os momentos.

À minha orientadora, Maria da Consolação Fonseca de Albuquerque, que me concedeu a oportunidade de realizar esse trabalho, pela orientação, pela paciência, pela atenção e por todos os conhecimentos transmitidos.

Aos técnicos e amigos do laboratório de Engenharia Civil da UNESP, em especial, Gilson Campus Correa, Flávio Rogério Porato e Ozias da Silva Porto, por todo suporte, paciência e empenho.

Aos meus professores da pós-graduação, que contribuíram com a minha formação e que de alguma forma me incentivaram a seguir em sua profissão.

Ao grupo de Pesquisa em Materiais Alternativos de Construção - MAC que participei durante a pós-graduação por todo aprendizado e oportunidades de crescimento.

Aos meus colegas de “república” Guilherme Amorim, Vinicius Amorim e Luiz Roéfero pelos momentos vividos juntos e pela companhia ao longo da pós-graduação.

Aos amigos que fiz durante o mestrado, pelos estudos, horas de diversão, reflexão e aprendizado, em especial, ao Marcelo Bortoletto, ao Rodrigo Garozi, ao Felipe Sposito, ao Rodrigo Bispo, ao Daniel Benjamim, ao Renan Dias, ao Gean Junior, a Eduarda Tokuda, a Anielle Pardo, a Gabriela Vicente e a Mariana Trevisan.

Aos amigos de longa data, Alexandre Oliveira, Danilo Vezzani, João Victor Souza, Mariana Lopes, Pedro Moraes e Rafael Feresin, por serem minha segunda família e pelo carinho, companheirismo, conselhos e apoio.

À faculdade de engenharia de Ilha Solteira, UNESP, onde foram realizadas todas as etapas desse projeto, e em especial, ao Departamento de Engenharia Civil, por todas as oportunidades ao longo desses anos em Ilha Solteira.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq pelo financiamento que permitiu a elaboração dessa pesquisa, a Mineração Grandes Lagos LTDA pela doação do agregado graúdo, ao Porto de Areia Nossa Senhora Aparecida pela doação do agregado miúdo e a GCP Applied Technologies pela doação do superplastificante.

“...Educar é um ato político...”

(Paulo Freire)

RESUMO

Levando-se em consideração as situações atuais de drenagem urbana das cidades brasileiras o uso de concreto permeável para mitigar os problemas resultantes do mal gerenciamento do escoamento de água torna-se uma opção. Dessa forma, para analisar o comportamento do concreto permeável, produziu-se oito composições de concreto permeável, com três traços (1:3,5; 1:5,0; 1:6,5) para cada composição. Nessas variou-se a granulometria do agregado graúdo e adicionou-se areia e sílica às composições nas proporções de 5 e 10%. Dessa forma, foi possível verificar a influência do tamanho do agregado e da adição de materiais finos na resistência e no coeficiente de permeabilidade do concreto. A comparação dos resultados obtidos com mesmo traço, com agregados de tamanhos diferentes, demonstrou que, ao diminuir o diâmetro do agregado ganha-se resistência a compressão axial e perde-se coeficiente de permeabilidade. Além disso, em todos os traços estudados, ao adicionar materiais finos, esse comportamento se repete. No geral, os resultados de resistência e de coeficiente de permeabilidade obtidos com as adições de sílica foram superiores aos com adições de areia. Por fim, foi possível propor um diagrama de dosagem adaptado que permitiu de forma prática, determinar qual o traço mais adequado de acordo com a necessidade do projeto.

Palavras-chave: Concreto permeável. Dosagem. Resistência mecânica. Permeabilidade.

ABSTRACT

In the context of the current situations of urban drainage in Brazilian cities, the use of permeable concrete becomes an option to mitigate the problems resulting from poor management of water flow. To analyze the behavior of pervious concrete, 8 pervious concrete compositions were produced, with 3 distinct proportions (1:3,5; 1:5,0; 1:6,5) for each. In these compositions the granulometry of the coarse aggregate was varied and sand and silica were added to the compositions in the proportions of 5 and 10%. It was possible to verify the influence of the size of the aggregate and the addition of fine materials on the compressive strength and permeability coefficient of the pervious concrete. The comparison of the results obtained with the same mix with aggregates of different sizes showed that by decreasing the diameter of the aggregate, resistance to axial compression is gained and the permeability coefficient is lost. Furthermore, in all the studied mixtures when adding materials, this behavior is repeated. In general, the resistance and permeability coefficient results obtained with silica additions were superior to those with sand additions. Finally, it was proposed an adapted dosage diagram that can be used to identify the mixture that better adequate according to the needs of the project.

Keywords: Pervious concrete. Dosage. Mechanical strength. Permeability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Publicações na plataforma ScienceDirect desde 1997.....	17
Figura 2: Concreto Permeável.....	21
Figura 3: Esquema Pavimentos Permeáveis.....	23
Figura 4: Colmatação Resultante do Excesso de Água na Mistura.....	25
Figura 5: Concreto Permeável em Funcionamento	27
Figura 6: Comparação Visual de Traços com Diferentes Granulometrias	30
Figura 7: Curva Granulométrica dos Agregados	34
Figura 8: Índice de Vazios – Métodos de Capeamento	43
Figura 9: Massa Específica – Métodos de Capeamento	43
Figura 10: Permeabilidade – Métodos de Capeamento	44
Figura 11: Métodos de Capeamento	45
Figura 12: Resistência a Compressão Axial – Métodos de Capeamento.....	46
Figura 13: Diagrama de Dosagem de Concreto Comum.....	51
Figura 14: Massa Específica – Traços	53
Figura 15: Massa Específica - Traços de Brita 1	54
Figura 16: Massa Específica – Traços Brita 0	55
Figura 17: Índice de Vazios – Traços	62
Figura 18: Índice de Vazios – Traços Brita 1	63
Figura 19: Índice de Vazios – Traços Brita 0.....	64
Figura 20: Coeficiente de Permeabilidade – Traços.....	70
Figura 21: Coeficiente de Permeabilidade – Traços Brita 1	71
Figura 22: Coeficiente de Permeabilidade – Traços Brita 0	72
Figura 23: Resistência a Compressão Axial – Traços.....	79
Figura 24: Compressão Axial – Brita 1	80
Figura 25: Compressão Axial – Traços Brita 0	81
Figura 26: Traço Rico – Autor x Equação de Gaedicke et al. (2016).....	88
Figura 27: Traço Médio – Autor x Equação de Gaedicke et al. (2016)	89
Figura 28: Traço Pobre – Autor x Equação de Gaedicke et al. (2016)	89
Figura 29: Comparação Tração Indireta – Autor x Gaedicke <i>et al.</i> (2016)	90
Figura 30: Tração na Flexão – Obtenção pela Equação de Chhorn <i>et al.</i> (2018)	91

Figura 31: Diagrama de Dosagem – Brita 1	96
Figura 32: Diagrama de Dosagem – Brita 0	97
Figura 33: Seleção de um Ponto no Diagrama de Dosagem	98
Figura 34: Traço Obtido pelo Ponto Selecionado	99



LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades Físicas e Químicas do Cimento.....	34
Tabela 2: Propriedades Físicas dos Agregados	35
Tabela 3: Características da Sílica Ativa	36
Tabela 4: Traço em Massa Proposto para Análise dos Métodos de Capeamento	42
Tabela 5: ANOVA – Índice de Vazios das Amostras	44
Tabela 6: ANOVA – Massa Específica das Amostras	44
Tabela 7: ANOVA – Coeficiente de Permeabilidade das Amostras.....	45
Tabela 8: Análise Estatística Geral dos Métodos de Capeamento.....	46
Tabela 9: ANOVA – Resistência a Compressão dos Métodos.....	47
Tabela 10: Traços em Massa Elaborados	50
Tabela 11: Massa Específica – Estatística	57
Tabela 12: ANOVA – Massa Específica Traços B1.....	58
Tabela 13: ANOVA – Massa Específica Traços B0.....	58
Tabela 14: Teste de Tukey – Massa Específica – Brita 1 – Traço 1:3,5.....	59
Tabela 15: Teste de Tukey – Massa Específica – Brita 1 – Traço 1:5,0.....	59
Tabela 16: Teste de Tukey – Massa Específica – Brita 1 – Traço 1:6,5.....	59
Tabela 17: Teste de Tukey – Massa Específica – Brita 0 – Traço 1:3,5.....	60
Tabela 18: Teste de Tukey – Massa Específica – Brita 0 – Traço 1:5,0.....	60
Tabela 19: Teste de Tukey – Massa Específica – Brita 0 – Traço 1:6,5.....	61
Tabela 20: Índice de Vazios – Estatística.....	66
Tabela 21: ANOVA – Índice de Vazios Traços B0.....	67
Tabela 22: ANOVA – Índice de Vazios Traços B1.....	67
Tabela 23: Teste de Tukey – Índice de Vazios – Brita 1 – Traço 1:3,5	67
Tabela 24: Teste de Tukey – Índice de Vazios – Brita 1 – Traço 1:5,0	68
Tabela 25: Teste de Tukey – Índice de Vazios – Brita 1 – Traço 1:6,5	68
Tabela 26: Teste de Tukey – Índice de Vazios – Brita 0 – Traço 1:3,5	68
Tabela 27: Teste de Tukey – Índice de Vazios – Brita 0 – Traço 1:5,0	69
Tabela 28: Teste de Tukey – Índice de Vazios – Brita 0 – Traço 1:6,5	69
Tabela 29: Coeficiente de Permeabilidade – Estatística	74
Tabela 30: ANOVA – Coeficiente de Permeabilidade Traços B0	75

Tabela 31: ANOVA – Coeficiente de Permeabilidade Traços B1	75
Tabela 32: Teste de Tukey – Coef. de Permeabilidade – Brita 1 – Traço 1:3,5	76
Tabela 33: Teste de Tukey – Coef. de Permeabilidade – Brita 1 – Traço 1:5,0	76
Tabela 34: Teste de Tukey – Coef. de Permeabilidade – Brita 1 – Traço 1:6,5	76
Tabela 35: Teste de Tukey – Coef. de Permeabilidade – Brita 0 – Traço 1:3,5	77
Tabela 36: Teste de Tukey – Coef. de Permeabilidade – Brita 0 – Traço 1:5,0	77
Tabela 37: Teste de Tukey – Coef. de Permeabilidade – Brita 0 – Traço 1:6,5	78
Tabela 38: Compressão Axial - Estatística	83
Tabela 39: ANOVA – Resistência à Compressão Axial Traços B0	84
Tabela 40: ANOVA – Resistência à Compressão Axial Traços B0	84
Tabela 41: Teste de Tukey – Res. Comp. Axial – Brita 1 – Traço 1:3,5	85
Tabela 42: Teste de Tukey – Res. Comp. Axial – Brita 1 – Traço 1:5,0	85
Tabela 43: Teste de Tukey – Res. Comp. Axial – Brita 1 – Traço 1:6,5	85
Tabela 44: Teste de Tukey – Res. Comp. Axial – Brita 0 – Traço 1:3,5	86
Tabela 45: Teste de Tukey – Res. Comp. Axial – Brita 0 – Traço 1:5,0	86
Tabela 46: Teste de Tukey – Res. Comp. Axial – Brita 0 – Traço 1:6,5	87
Tabela 47: Compressão Diametral – Estatística.....	92
Tabela 48: ANOVA – Resistência à Compressão Diametral Traços B0.....	93
Tabela 49: Teste de Tukey – Res. Comp. Diam. – Brita 0 – Traço 1:3,5	93
Tabela 50: Teste de Tukey – Res. Comp. Diam. – Brita 0 – Traço 1:5,0	94
Tabela 51: Teste de Tukey – Res. Comp. Diam. – Brita 0 – Traço 1:6,5	94
Tabela 52: Consumo de Cimento por Cada Traço	95

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BMPs	<i>Best Management Practices</i>
CP	Cimento Portland
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
EUA	Estados Unidos da América
FEIS	Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transformer</i>
NBR	Norma Brasileira
NEPAE	Núcleo de Ensino e Pesquisa em Alvenaria Estrutural
NM	Norma Mercosul
PCA	<i>Portland Cement Association</i>
PNAD	Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios
SP	São Paulo
UNESP	Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
°C	Graus Celsius
μ	Massa Específica
a	Quantidade de Areia em Massa
a/c	Relação água/cimento em Massa
b	Quantidade de Brita em Massa
C	Consumo de Cimento
E	Módulo de Elasticidade
f_c	Resistência a Compressão Axial
$f_{cr,f}$	Resistência a Tração na Flexão
f_{ct}	Resistência a Compressão Diametral
I	Índice de Vazios
k	Coeficiente de Permeabilidade
pH	Potencial Hidrogeniônico
R^2	Coeficiente de Determinação
μ_a	Massa Específica Areia
μ_b	Massa Específica Brita
μ_{H_2O}	Massa Específica Água
ε	Deformação
ρ_s	Massa Específica Seca

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	16
1.2	OBJETIVOS.....	19
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1	CONCRETO PERMEÁVEL: VISÃO GERAL.....	21
2.2	COMPOSIÇÃO DO CONCRETO PERMEÁVEL.....	27
2.3	ANÁLISES DE RESISTÊNCIA.....	31
3	MATERIAIS E METODOS	33
3.1	MATERIAIS.....	33
3.2	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA	36
3.3	PROCEDIMENTOS LABORATORIAIS.....	39
3.4	DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DOS TRAÇOS	47
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
6	CONCLUSÕES	100
	REFERÊNCIAS	102

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

De acordo com os dados da *Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios* (PNAD), aproximadamente 85% da população brasileira vive em áreas urbanas, e desses, cerca de 37% são resultado do êxodo rural ocorrido a partir de 1980. (IBGE, 2015)

Dessa forma, o crescimento das populações e de sua concentração nas áreas urbanas das cidades, acompanhado de um processo desordenado de urbanização, ocasiona um aumento nas superfícies impermeáveis e, conseqüentemente, uma sobrecarga dos sistemas de drenagem urbana. (VAZ *et al.*, 2020)

Para Lopes *et al.* (2020) a diminuição das áreas permeáveis contribui para o aumento no escoamento superficial gerando problemas urbanos como enchentes, alagamentos e a deterioração da qualidade das águas.

No Brasil, pela falta de planejamento e conscientização, os sistemas de drenagem urbana se basearam na busca do sistema hidráulico com maior eficiência drenante e não nos impactos gerados a jusante, ou seja, buscou-se conduzir as águas pluviais para fora da cidade sem levar em consideração os impactos ambientais em seu destino. (TEIXEIRA *et al.*, 2020)

Destacam Christofidis *et al.* (2019) e Zanandrea e da Silveira (2019) que para mitigar os problemas relacionados a drenagem urbana é necessário um planejamento urbano adequado e que sejam desenvolvidos métodos que levem em consideração os aspectos sociais, econômicos e ecológicos.

Nesse sentido estão inseridas as *Best Management Practices* (BPMs), desenvolvidas pela *Environmental Protection Agency* (EPA) nos Estados Unidos da América (EUA), que foram técnicas desenvolvidas nos anos 80 e baseadas no princípio básico de evitar a transferência dos problemas de montante para jusante. (BATEZINI, 2019)

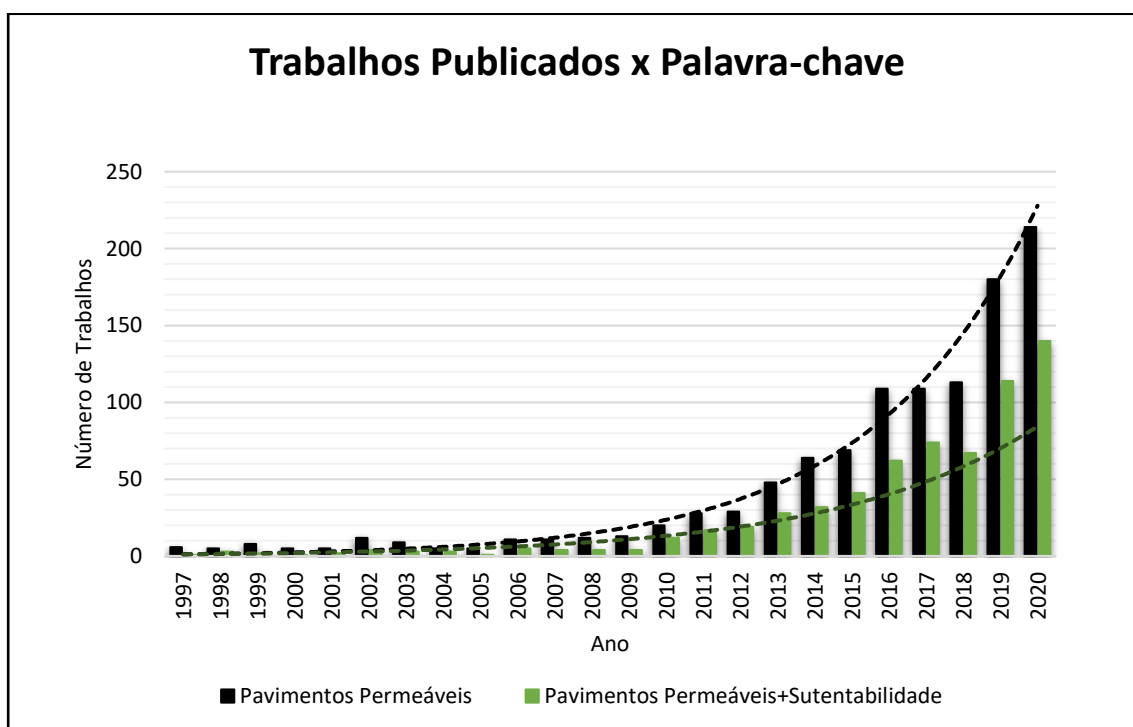
Silva (2019) destaca entre esses métodos a utilização de reservatórios de amortecimento de cheias e dos pavimentos permeáveis como ferramentas capazes

de infiltrar e armazenar o escoamento superficial nas áreas afetadas pela urbanização acelerada.

Impulsionados pela recente busca por metodologias sustentáveis e por alternativas mais ecológicas os estudos sobre os pavimentos permeáveis vêm gerando avanços em seus processos de projeto, produção e manutenção melhorando o entendimento sobre a tecnologia e a viabilidade de seu uso. (BRASWELL *et al.*, 2018)

Isso é comprovado quando verificamos as pesquisas relacionadas as palavras-chave “pavimento permeável” e “sustentabilidade” que vem sendo publicadas em periódicos de alta relevância nos últimos anos, como é possível verificar no gráfico da Figura 1.

Figura 1: Publicações na plataforma ScienceDirect desde 1997



Fonte: Autor.

O gráfico indica que existe um crescimento exponencial nas pesquisas referentes aos pavimentos permeáveis e na busca por tecnologias mais ecológicas uma vez que aproximadamente 65% também estão relacionados a sustentabilidade, no ano de 2020.

Selbig *et al.* (2019) define os pavimentos permeáveis como sistemas de infiltração total ou parcial capazes de drenar e devolver ao solo nativo o excesso de água que se tornaria escoamento superficial.

Para Batezini (2019), o pavimento permeável é um equipamento urbano de infiltração capaz de absorver parcialmente ou totalmente um escoamento em um reservatório de britas, com graduação uniforme e sobre um subleito bem definido. Além disso, devido ao elevado percentual de vazios em sua estrutura, possui a capacidade de atuar como reservatório, o que reduz a necessidade de sistemas de gestão de águas pluviais.

Entre os tipos de pavimentos permeáveis destacam-se três: pavimento de asfalto permeável; pavimento de concreto permeável; e pavimento de blocos intertravados de concreto permeável.

Dentre os pavimentos permeáveis, destaca-se o pavimento de concreto permeável uma vez que possui a manutenção de sua capacidade drenante por maiores períodos e por possuir uma alta flexibilidade em relação as possíveis adições químicas e minerais em sua composição, viabilizando a busca pelo aprimoramento da tecnologia. (SILVA, 2019)

Mesmo considerando as boas características que os concretos permeáveis possuem em relação a drenagem urbana, AlShareedah *et al.* (2019) ressaltam que, devido a grande quantidade de vazios em sua estrutura eles possuem também características mecânicas inferiores quando comparados a concretos convencionais.

Dessa forma, é essencial desenvolver a tecnologia dos pavimentos de concreto permeável de tal forma a diminuir os problemas causados pelas áreas impermeáveis da cidade e garantir uma resistência mecânica satisfatória.

Saboo *et al.* (2019) destacam que uma das maneiras de melhorar o comportamento estrutural dos pavimentos de concreto permeável é pela adição de materiais finos com características pozolânicas como por exemplo a cinza volante, o metacaulim e a sílica ativa.

Os autores afirmam também que, apesar desse tipo de adição trazer mais homogeneidade a concreto e auxiliar na ligação entre a pasta e o agregado, ela é limitada, uma vez que o fator que garante a permeabilidade do concreto é justamente a ausência de materiais finos.

Assim, é importante buscar alternativas que melhorem as características resistentes do concreto e que não causem uma diminuição drástica nas características drenantes do mesmo.

Nesse contexto, uma alternativa é estudar qual a influência da adição desses materiais no concreto, ou seja, se é possível melhorar o desempenho mecânico sem perder desempenho drenante.

1.2. OBJETIVOS

Levando em consideração a relevância do concreto permeável e do seu uso esse trabalho tem os seguintes itens como objetivos gerais:

- a. Desenvolver traços de concreto permeável com adições de areia e sílica buscando atender de forma satisfatória as características drenantes e mecânicas, com a finalidade de aplicação em pavimentos;
- b. Analisar os traços desenvolvidos em relação a sua permeabilidade, porosidade, massa específica e resistências a compressão axial e diametral e a tração na flexão.
- c. Produzir um diagrama de dosagem adaptado dos traços produzidos que permita selecionar de maneira simplificada o melhor traço para cada finalidade.

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

O primeiro capítulo dessa dissertação apresenta a introdução do tema a ser estudado, os objetivos gerais e específicos do mesmo e sua estrutura de formatação.

O segundo capítulo expõe a partir de uma revisão bibliográfica as principais características dos pavimentos de concreto permeável e a influência das adições realizadas nos trabalhos de outros autores.

O terceiro capítulo aponta o trabalho laboratorial englobando os materiais e os métodos utilizados no trabalho.

O quarto capítulo engloba os resultados obtidos pelo autor, a discussão e análise dos resultados obtidos e as comparações realizadas em relação à bibliografia estudada.

O quinto capítulo exhibe, de maneira geral, as conclusões e os pontos mais relevantes do trabalho.

Por fim, o sexto capítulo apresenta as referências bibliográficas que foram utilizadas na dissertação.



2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

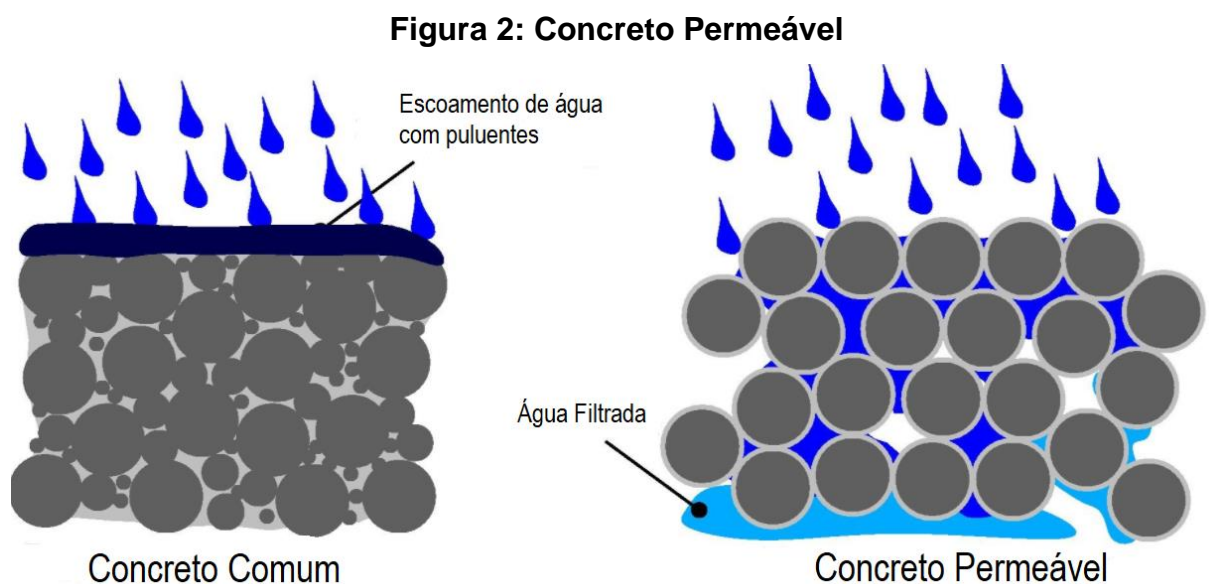
2.1. CONCRETO PERMEÁVEL: VISÃO GERAL

Uma crescente preocupação econômica e ambiental; assim como as mudanças climáticas e a urbanização têm gerado novos desafios para a gestão dos sistemas de água das cidades.

Nieuwenhuis *et al.* (2020) explicitam que as práticas tradicionais, de combate aos problemas relacionados ao gerenciamento das águas urbanas, têm se tornado obsoletas e isso gera a busca por melhores alternativas.

O uso do concreto permeável como uma alternativa aos pavimentos tradicionais em locais como calçadas, estacionamentos e vias de tráfego de veículos leves, para o controle a água superficial, tem se mostrado uma opção ambientalmente sustentável. (ELANGO *et al.*, 2020)

Xie *et al.* (2019) definem os pavimentos de concreto permeável como um tipo de pavimento de concreto que possui uma rede de poros conectados capaz de permitir a passagem da água da camada de revestimento para as camadas de base e sub-base, como pode ser visto na Figura 2.



Fonte: Modificado de Zhong et al. (2018)

Zhong *et al.* (2018) listam as principais vantagens do uso de pavimentos de concreto permeável como sendo:

- Redução do volume do escoamento superficial de água;
- Redução da poluição gerada pelo escoamento superficial de água;
- Reabastecimento dos lençóis freáticos;
- Melhora dos cuidados com a vegetação da cidade;
- Diminuição da infraestrutura necessária para os cuidados com drenagem urbana;
- Redução dos efeitos de “ilhas de calor”;
- Aumento na segurança no tráfego;
- Possibilidade de retenção e biodegradação de óleos e outros contaminantes;
- Aumento do desempenho sonoro dos pavimentos;

Os autores listam também as duas principais desvantagens:

- Risco de entupimento dos pavimentos caso não sejam tomados os devidos cuidados de produção e de manutenção;
- Limitações em durabilidade e resistência;

O fato de o concreto permeável ser capaz de combater as “ilhas de calor” e de diminuir os ruídos gerados pelo tráfego de veículos são características importantes na avaliação dos benefícios indiretos da utilização desses pavimentos.

Chu *et al.* (2017) indicam que é possível obter coeficientes de absorção do som produzido pela passagem dos carros em quase 90%, variando de acordo com a granulometria empregada na dosagem.

Já Li *et al.* (2013) demonstram que é possível obter uma diminuição de quase 7°C na superfície de pavimentos permeáveis em relação a pavimentos comuns, variando de acordo com a umidade do local em que é empregado o pavimento.

Pavimentos permeáveis são geralmente compostos por um revestimento, uma camada de base, podendo ou não conter uma sub-base variando de acordo com o projeto, e por fim o solo no qual será construído o pavimento.

Silva (2019) indica que a espessura dessas camadas depende da solicitação de projeto e que, geralmente, é necessário avaliar se as camadas inferiores terão função de reservatório (caso possuam coeficiente de permeabilidade maior que o do solo).

É importante ressaltar que podem ser adicionadas outras camadas a estrutura, como camadas filtrantes, que tem função de proteger o solo e a estrutura do pavimento, podendo ser constituídas por mantas geotêxteis permeáveis ou por lençóis de britas com variadas granulometrias.

Um esquema básico dos pavimentos permeáveis é apresentado na Figura 3.

Figura 3: Esquema Pavimentos Permeáveis



Fonte: Autor.

Para que um concreto seja considerado permeável é necessário avaliar características como seu coeficiente de permeabilidade e o índice de vazios. Geralmente, essas são as principais características estudadas e avaliadas na bibliografia para verificar a permeabilidade de um concreto.

Ibrahim *et al.* (2014) estima que para que um concreto permeável tenha bom desempenho na drenagem da água é necessário que ele possua entre 15 e 35% de índice de vazios.

Os autores indicam que com esse percentual de vazios em seu volume é possível garantir que os poros fiquem conectados, permitindo a passagem da água. Para que esses valores sejam atingidos, a produção do concreto permeável se dá

através da remoção ou redução dos materiais finos que geralmente são empregados na produção do concreto, como: agregados miúdos e materiais pozolânicos.

Não existe na literatura uma definição de valores mínimos ou máximos para a permeabilidade do concreto permeável. Nesse contexto, Elango *et al.* (2020) sugerem que o concreto permeável tenha em média de 2 a 8mm/s de coeficiente de permeabilidade.

Dessa forma, é necessário que sejam realizados estudos prévios em relação ao local no qual o concreto permeável será empregado. A intensidade, frequência e duração das chuvas como também as áreas de contribuição do escoamento definem o quão permeável deve ser o pavimento.

No Brasil, a norma responsável por definir as limitações do concreto permeável é a NBR 16416 (ABNT, 2015) que exige um mínimo de 1mm/s de coeficiente de permeabilidade.

Esse valor é baixo levando-se em consideração que, justamente um dos principais problemas relacionados ao uso do concreto permeável é o entupimento dos poros e conseqüente impermeabilização do pavimento. (ELANGO, 2020)

Para a resistência a compressão dos concretos permeáveis, Xie *et al.* (2019) indicaram que a maioria dos autores obteve valores que variam de 5 a 22MPa nos ensaios de compressão axial.

Esses valores são relativamente baixos quando comparados com as resistências obtidas em concreto convencionais, onde geralmente, obtêm-se pelo menos 30MPa de resistência.

Dessa forma, a baixa resistência se torna um fator limitante ao uso do concreto permeável. Apesar dessa característica, os principais usos no mesmo não requerem elevadas resistências. Silva (2019) destaca alguns usos para o concreto permeável que não requerem altas resistências, entre eles:

- Pavimentos de tráfego de veículos leves;
- Ciclovias e calçadas;
- Estacionamentos;
- Quadras para alguns esportes;
- Base ou Sub-base para pavimentos convencionais;

A baixa resistência não é o único problema na produção de um concreto permeável. Em geral, a dosagem dos traços requer cuidados com a relação água/cimento que outros concretos não necessitam.

A relação água/cimento influencia não apenas na trabalhabilidade do traço, mas também na resistência final do concreto. Isso ocorre, pois, a falta de água atrapalha a hidratação do cimento.

Singh *et al.* (2020), a partir de uma análise da bibliografia existente, define que o limite da quantidade de água no traço depende do tipo de adensamento que será realizado e que, geralmente, a relação varia de 0,25 a 0,45 em relação ao cimento.

Li *et al.* (2017) destacam que os principais desafios da utilização do concreto permeável estão em combater: baixas resistências, grandes tendências de entupimento dos poros (durante a dosagem e durante a vida útil) e a necessidade de manutenção regular.

A colmatação, que é o entupimento da parte interior do concreto, ocorre devido ao escorrimento da pasta ou por sujeira depositada posteriormente. No primeiro caso, pode ser resultado de três fatores: excesso de água na mistura, excesso de compactação do traço e excesso de pasta/argamassa na composição do traço. Esse fenômeno pode ser visualizado na Figura 4.

Figura 4: Colmatação Resultante do Excesso de Água na Mistura



Fonte: Autor.

Kia *et al.* (2017) ressaltam que a permeabilidade e a resistência a compressão do concreto permeável são características opostas no traço, ou seja, quanto maior o coeficiente de permeabilidade e o índice de vazios estimados, menor serão as resistências a compressão, tração e fadiga do concreto.

Além da relação água/cimento, outro fator que pode causar a colmatação dos corpos de prova é o adensamento excessivo. Putman e Neptune (2011), afirmam que, mesmo traços com baixas quantidades de água, podem colmatar caso adensados de maneira indevida.

Por outro lado, Sumanasooriya e Neithalath (2011) sugerem que, para manter a capacidade drenante do concreto permeável, quando em misturas com grandes quantidades de finos, seja diminuída a quantidade de compactação. Dessa forma, seria possível fazer traços mais fortes, sem colmatar o concreto.

Nesse sentido, Bhutta *et al.* (2012) produziu um concreto permeável “autoadensável”, onde não foi necessário compactação, e obteve valores na faixa de 15 a 25MPa de resistência a compressão, e de 10 a 20mm/s de coeficiente de permeabilidade.

Isso indica que, mesmo para traços com elevado percentual de finos, e boa trabalhabilidade, é possível produzir um concreto permeável. Ainda assim, cuidados com sua compactação são essenciais para evitar o bloqueio dos poros.

Além desses cuidados, Yahia e Kabagire (2014) sugerem a escolha de um método de dosagem abrangente e que permite a produção de traços, com variadas composições, capazes de atender as solicitações de resistência e permeabilidade.

No Brasil, a norma NBR 12655 (ABNT, 2015) é a responsável pelo preparo, controle, recebimento e aceitação do concreto. Ainda assim, essa norma não determina uma metodologia de dosagem, ou seja, os construtores devem se basear em outros estudos e/ou teorias para produção de seus traços.

Bianchi (2019) considera como valores de suma importância na dosagem a relação água/cimento e o efeito da compactação nas propriedades do material para que não sejam obtidas proporções de mistura não padronizadas.

Nesse contexto, Helene e Terzian (1992) propuseram que, para uma análise mais abrangente dos traços produzidos, fossem produzidos traços em três

proporções variadas. Uma denominada forte, uma média e uma fraca; onde o que varia entre elas e a proporção entre os aglomerantes e os agregados.

2.2. COMPOSIÇÃO DO CONCRETO PERMEÁVEL

O concreto permeável pode ser produzido com os mesmos materiais utilizados nas composições de concreto de cimento Portland comum com a diferença de que a quantidade de agregados miúdos deve ser reduzida.

Os materiais que compõem o concreto permeável são basicamente os seguintes: aglomerante, agregados, água. Na proporção correta esses materiais proporcionam uma estrutura sólida com poros interligados para a passagem da água, como pode ser visualizado na Figura 5.

Figura 5: Concreto Permeável em Funcionamento



Fonte: TECNOSIL (2019).

Apesar da simplicidade de materiais que compõem o concreto permeável, se forem utilizados apenas os materiais usualmente utilizados em concretos comuns, o resultado será um concreto de baixa resistência.

Assim sendo, é necessário propor o uso de aditivos e adições de materiais que possibilitem o ganho de resistência sem a perda excessiva de permeabilidade. Entre esses materiais, os materiais pozolânicos são materiais que, adicionados ao concreto, resultam em um ganho substancial de resistência mecânica.

Para concretos convencionais, a adição de sílica como um fator para a produção de traços mais resistentes é inquestionável. No geral, a maioria dos autores trabalha com substituição a fim de usar materiais como cinzas, com alto teor de sílica em sua composição, para atender ao fator ecológico, diminuindo o uso do cimento.

Nesse caso, a substituição é mais limitada, uma vez que a partir de um certo ponto, à medida que se substitui cimento por outros materiais, ocorre uma diminuição da resistência.

Muthukumar *et al.* (2020) utilizaram sílica a partir da cinza do bagaço de cana e notaram que, a substituição de valores superiores a 15% causava diminuição na resistência final do traço pois o material acaba adsorvendo parte da água de hidratação devido a sua finura.

De forma semelhante, Suda e Sutradhar (2020) mostram que ao se substituir quantidades de cimento superiores a 10% por sílica, existe uma perda excessiva de trabalhabilidade, que vai causar a demanda de mais água, ou um aditivo superplastificante.

Adil *et al.* (2020) sugerem que a dosagem ideal de sílica para concretos permeáveis está na faixa de substituição de 10 a 20% do peso do cimento. Essa porcentagem depende da relação entre aglomerantes e agregados graúdos e, quando para traços mais fortes, deve ser inferior.

Huang *et al.* (2020) compararam a sílica ativa com a cinza volante e afirmam que, para valores abaixo de 10% de substituição, apenas a sílica é capaz de melhorar as características resistentes do concreto.

Os autores demonstram também que ao elevar a quantidade de finos acima dessa faixa na mistura do concreto permeável, a perda de permeabilidade torna o traço inviável.

Agar-Ozbek *et al.* (2013), ao produzirem traços com substituições de até 15% do cimento por sílica conseguiram produzir traços que continham resistências de compressão axial na ordem de 30 a 50MPa.

Ainda nesse contexto, Mohammed *et al.* (2018) realizaram adições de nano-sílica aos traços de concreto na ordem de 3% da massa e obtiveram valores de resistência na mesma faixa sem perdas excessivas de permeabilidade.

Assim, os autores afirmam que a adição causou menor variação dos resultados obtidos e que, para combater a diminuição da trabalhabilidade, é necessário o uso de um superplastificante.

Já Chaitanya e Ramakrishna (2020) adicionaram sílica ao concreto permeável em proporções de 8 a 16%, obtendo ganhos de resistência de aproximadamente 56 e 33%, para resistências a compressão e flexão, respectivamente.

Por outro lado, os autores afirmam também que isso causou uma diminuição de quase 60% em seu coeficiente de permeabilidade, mas, ainda assim, os valores obtidos ficaram na faixa de 10mm/s.

Outra forma de melhorar o desempenho mecânico do concreto permeável é através da escolha de uma granulometria mais adequada para o agregado graúdo utilizado.

Ibrahim *et al.* (2014) propõem a melhor graduação dos agregados empregados, com uma distribuição melhor, fazendo com que seja possível dar melhor uniformidade ao traço, sem preencher vazios.

Já Grubeša *et al.* (2018) ressaltam que a maior importância deve ser dada a forma dos agregados que serão empregados, onde, agregados com formatos menos redondos tem valores de resistência e de permeabilidade superiores.

E Yu *et al.* (2019) afirmam que aumentando o tamanho do agregado, mas mantendo a porcentagem de vazios constante, a resistência a compressão dos corpos de prova tende a aumentar.

Xu *et al.* (2021), assim como os autores anteriores, obtiveram resultados superiores de resistência a fratura à medida que aumentaram o tamanho do agregado, tomando os devidos cuidados para manter o índice de vazios em faixas constantes.

Além disso, Huang *et al.* (2020) afirmam que a escolha do material que constitui a brita utilizada é de suma importância. Os autores obtiveram resultados superiores de resistência quando compararam britas de origem diabásica em relação as britas basálticas.

É possível comparar os traços de mesma composição com britas de diferentes granulometrias visualmente a partir das Figura 6.

Figura 6: Comparação Visual de Traços com Diferentes Granulometrias



Fonte: Autor.

Apesar da avaliação dos concretos permeáveis ser, geralmente, realizada a partir da análise da resistência a compressão axial, esses concretos têm a finalidade

de uso para pavimentos permeáveis, dessa forma, é imprescindível que a análise do coeficiente de permeabilidade seja feita simultaneamente.

Geralmente, um concreto comum é analisado a partir de suas características mecânicas: resistências a compressão axial (f_c) e a tração por compressão diametral ou flexão (respectivamente, $f_{ct,sp}$ e $f_{ct,f}$), módulo de elasticidade (E) e deformação (ϵ).

Para o concreto permeável Selbig *et al.* (2019) sugere que esses parâmetros tem menor relevância para analisar seu comportamento e sua adequabilidade para o uso, uma vez que, em âmbito geral, a função drenante sobrepõe a estrutural.

Ou seja, primeiramente deve-se analisar os parâmetros relacionados a permeabilidade do concreto, e depois buscar adequar sua resistência ao uso que lhe será dado.

Dessa forma, as principais características do concreto permeável a serem analisadas são o coeficiente de permeabilidade (k) e o índice de vazios (I), uma vez que esses parâmetros nos permitem analisar o comportamento dele na sua função principal: drenar a água.

Nesse trabalho buscou-se atender primeiramente a capacidade drenante do concreto para depois buscar, a partir da manipulação do traço, resistências mecânicas superiores adequadas para cada uso mantendo uma elevada permeabilidade.

2.3. ANÁLISES DE RESISTÊNCIA

A maior parte dos autores estudados realizaram apenas ensaios de resistência a compressão em seus corpos de prova. Essa análise é superficial, uma vez que está se produzindo um concreto para exercer a função de pavimento.

Dessa forma, buscou-se na bibliografia autores que houvessem relacionado a resistência a compressão com a resistência tração por compressão diametral e na flexão.

Essa análise viabiliza o estudo de forma mais coerente do concreto permeável e permite análise seu comportamento estrutural de forma mais completa sem a necessidade de produção de um número elevado de corpos de prova.

Para Chhorn *et al.* (2018), é possível associar a resistência a compressão axial a resistência a tração por compressão diametral no concreto compactado por rolo e de “slump” igual a zero por meio da Equação 1.

$$f_{ct,sp} = 0,47 * (f_c)^{0,511} \quad (1)$$

Onde:

$f_{ct,sp}$: Resistência a tração por compressão diametral (MPa);

f_c : Resistência a compressão axial (MPa);

Os autores definem também a Equação 2 por meio da qual é possível associar a resistência a compressão axial com a resistência a tração na flexão.

$$f_{ct,f} = 0,678 * (f_c)^{0,605} \quad (2)$$

Onde:

$f_{ct,f}$: Resistência a tração na flexão (MPa);

É possível verificar, analisando as equações, que a estimativa da resistência a tração na flexão tende a ser maior que a resistência a tração por compressão diametral para os concretos de *slump* nulo e compactados a rolo.

Buscou-se então na bibliografia por trabalhos que fizessem essa comparação para o concreto permeável. Dessa forma, foi possível verificar que Gaedicke *et al.* (2016) associaram a resistência a compressão axial a resistência a tração por compressão diametral no concreto permeável por meio da Equação 4.

$$f_{ct,sp} = 0,181 * (f_c)^{0,875} \quad (3)$$

3. MATERIAIS E METODOS

Todos os ensaios de caracterização dos materiais apresentados nesse trabalho foram realizados no laboratório central de engenharia civil da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS), da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), no campus central da cidade.

Os ensaios de análise mecânica foram realizados no Núcleo de Ensino e Pesquisa em Alvenaria Estrutural (NEPAE) da mesma universidade.

3.1. MATERIAIS

Para a confecção dos traços foram utilizados os materiais comumente encontrados na região da pesquisa sendo eles um aglomerante (cimento), agregados graúdos (brita basáltica) de duas faixas granulométricas, agregado miúdo (areia), material pozolânico (sílica ativa), aditivo superplastificante e água.

a. AGLOMERANTE

O aglomerante utilizado foi o cimento Portland Composto com Fíler (CP II-F-32) da marca Itaú ® indicado em suas especificações técnicas para todos os tipos de obras e produzido atendendo a NBR 16697 (ABNT, 2018) pelo fabricante. A massa específica média do cimento foi de 3,02g/cm³ obtida seguindo a NBR 16605 (ABNT, 2017).

Esse cimento é caracterizado por conter a adição de 6 a 10 % de fíler calcário e sua composição pode conter de 75 a 89% de clínquer mais gesso e de 11 a 25% de material carbonático. (VOTORANTIM, 2020)

As propriedades físicas e químicas do cimento estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Propriedades Físicas e Químicas do Cimento

Propriedades Físicas e Químicas do Cimento		Dias	fc (Mpa)
pH em Solução Aquosa	$12 \leq \text{pH} \leq 14$	1	10
Massa Específica Aparente	0,9 a 1,2g/cm ³ a 20°C	Resistência Compressão Axial	18
Massa Específica Absoluta	2,8 a 3,2g/cm ³ a 20°C		
Solubilidade em Água	até 1,5g/l a 20°C		
		28	33

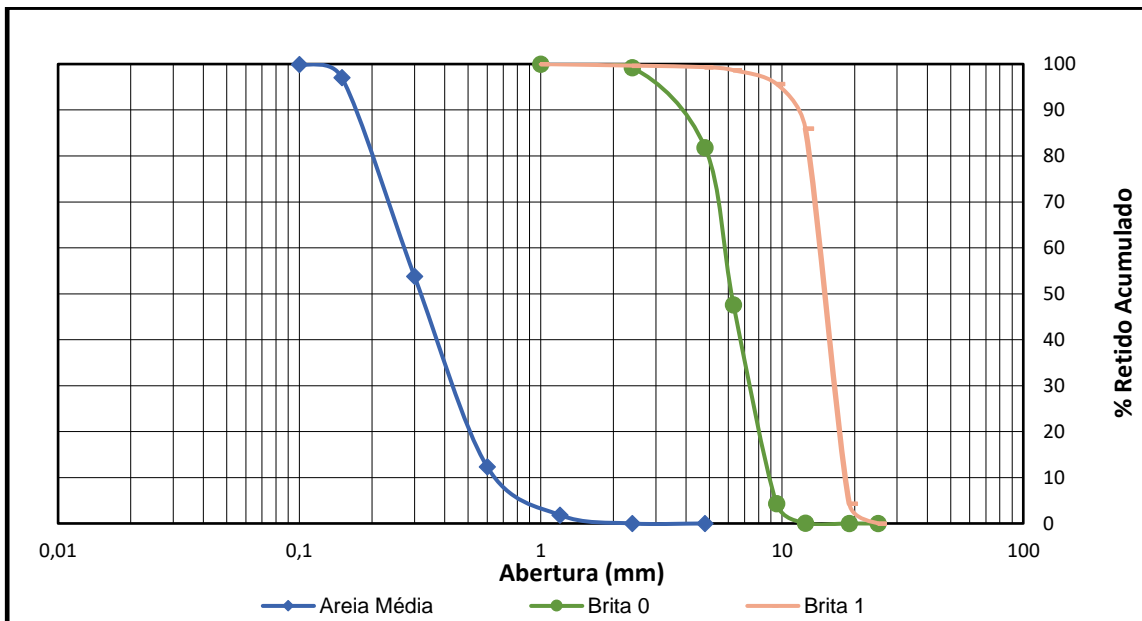
Fonte: VOTORANTIM (2020).

b. AGREGADOS

Para a elaboração dos traços de concreto permeável foram utilizados agregados graúdos de origem basáltica em duas dimensões e o agregado miúdo fino, sendo os três encontrados na região de estudo seguindo as especificações da NBR 7211 (ABNT, 2009) quanto aos limites em sua granulometria.

Os agregados graúdos foram extraídos da pedreira localizada no município de Itapura – SP e o miúdo do porto de areias de município de Castilho - SP. Comercialmente esses agregados são denominados como areia média, brita 0 (pedrisco) e brita 1 sendo sua granulometria indicada na Figura 7.

Figura 7: Curva Granulométrica dos Agregados



Fonte: Autor.

As propriedades físicas do agregado miúdo foram medidas seguindo a NBR NM 52 (ABNT, 2009) para massa específica e a NBR NM 30 (ABNT, 2001) para a absorção de água. Quanto ao agregado graúdo, os dois parâmetros foram obtidos seguindo a NBR NM 53 (ABNT, 2009).

Essas propriedades estão indicadas na Tabela 2.

Tabela 2: Propriedades Físicas dos Agregados

Material	μ (g/cm³)	Absorção (%)	Módulo de Finura	Dimensão Máxima (mm)
Areia	2,63 ± 0,04	0,49 ± 0,06	2,65	1,20
Brita 0 (Pedrisco)	2,82 ± 0,03	2,55 ± 0,05	3,33	12,50
Brita 1	2,94 ± 0,05	3,03 ± 0,06	5,84	19,00

Fonte: Autor.

c. ADITIVO

Foi utilizado o aditivo superplastificante Tec-Flow 7000 a fim de compensar o baixo fator água/cimento utilizado na dosagem. O aditivo estava de acordo com a NBR 11768 (ABNT, 2019) e sua massa específica foi de aproximadamente 1,09g/cm³, com aspecto viscoso e cor variável de amarelo a âmbar.

Sua dosagem foi realizada no fator de 0,5% sobre o peso do cimento, que é o mínimo sugerido pelo fabricante que indica a faixa de 0,5 a 1,5% sobre o peso do aglomerante.

d. ÁGUA

A água utilizada foi proveniente da rede de distribuição do município de Ilha Solteira – SP, sua origem é de captação via poços profundos do lençol freático da bacia hidrográfica do São José dos Dourados.

e. ADIÇÕES

Foi adicionada sílica ativa Tecnosil nos traços realizados com brita 0 nas proporções de 5 e 10% como sugerido pelo fabricante. Essas proporções foram

seguidas também para que pudesse ser realizada a comparação com os traços que continham areia.

A dosagem foi feita em adição de 5 e 10% em relação ao peso do cimento, o fabricante garante que a sílica atende a NBR 13956 (ABNT, 2012) e as características físicas da sílica utilizada estão na Tabela 3.

Tabela 3: Características da Sílica Ativa

Características da Sílica Ativa	
Massa Específica (g/cm ³)	2,22
Teor de SiO ₂	≥ 90%
Superfície Específica (m ² /kg)	19.000
Formato da Partícula	Esférico
Diâmetro Médio (mm)	0,0002

Fonte: TECNOSIL (2020).

3.2. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA

No Brasil, os parâmetros para a uso do concreto permeável moldado no local são dados pela NBR 16614 (ABNT, 2015), que limita o seu uso em função do coeficiente de permeabilidade mínimo ($k > 1\text{mm/s}$), da massa específica mínima ($\mu > 1600\text{kg/m}^3$) e da resistência a tração à flexão mínima ($f_{ct,f} > 1\text{MPa}$ para pedestres e $f_{ct,f} > 2\text{MPa}$ para veículos leves).

a. MASSA ESPECÍFICA

A massa específica determinada nesse trabalho foi a da amostra seca (ρ_s), de acordo com a NBR 9778 (ABNT, 2005). Ela é sugerida pela NBR 16416 (ABNT, 2015) como uma forma de comprovação da massa específica do concreto e definida como a relação entre a massa do material seco e o volume total da amostra, incluindo os poros permeáveis e impermeáveis.

Buscou-se adequar os traços produzidos aos concretos estruturais normais que são definidos pela NBR 8953 (ABNT, 2015) como aqueles que possuem a massa específica entre 2000 e 2800kg/m³.

Ajustou-se os valores obtidos pela metodologia de adensamento do concreto e isso garantiu uma margem satisfatória as exigências mínimas da norma.

b. ÍNDICE DE VAZIOS

Apesar do índice de vazios estar relacionado diretamente a permeabilidade do concreto, não existe na norma um fator limitante para essa característica. A maioria dos autores trabalham na faixa entre 15 e 25%, que é a faixa sugerida por Tennis *et al.* (2004).

O índice de vazios foi determinado utilizando a norma NBR 8953 (ABNT, 2015) e é definido como a relação entre o volume de poros permeáveis da amostra e o volume total da amostra.

Buscou-se trabalhar na faixa sugerida uma vez que abaixo de 15%, a permeabilidade do concreto seria diminuída drasticamente, e acima dos 25%, sua resistência poderia não ser adequada.

c. COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE (TAXA DE INFILTRAÇÃO)

O coeficiente de permeabilidade representa a velocidade com que uma determinada quantidade de água percola um elemento ou estrutura permeável e é o fator mais importante na avaliação do concreto poroso que, geralmente, é dimensionado para atender a demanda do ambiente em que o pavimento vai ser instalado.

Com o passar do tempo, o material sólido presente nos escoamentos e no ar vai se depositando no concreto permeável e isso faz com que exista uma diminuição gradativa de sua permeabilidade.

Para evitar que o pavimento deixe de estar de acordo com a norma em um curto período, deve-se dimensionar o pavimento com uma taxa de infiltração superior ao mínimo solicitado de 1mm/s.

Para Batezini e Balbo (2015), ao comparar dois métodos de análise, o de carga hidráulica constante e o de carga hidráulica variável, foi possível verificar que,

devido a diferenciação dos métodos de aferição, ocorrem diferenças entre os valores obtidos tendo o primeiro valores inferiores e mais próximos da realidade.

Para a aferição da taxa de infiltração nesse trabalho foi utilizada a ISO 17785-1 (ISO, 2016) que, de forma simplificada, utiliza o método de carga constante para o cálculo.

A taxa de infiltração alvo durante as dosagens foi de 10mm/s pois dessa forma seria possível garantir, com ampla margem, que a norma NBR 16416 (ABNT, 2015) estaria sendo atendida, antecipando também, possíveis problemas posteriores que resultassem na diminuição da taxa de infiltração.

d. ENSAIOS DE RESISTÊNCIA

Os ensaios de resistência foram realizados em uma máquina universal de ensaio EMIC modelo DL 20000 certificada de acordo com a NBR ISO 7500-1 (ABNT, 2016) capaz de realizar ensaios de compressão axial especificados na NBR 5739 (ABNT, 2018) e na NBR 7680 (ABNT, 2015), tração por compressão diametral como especificado na NBR 7222 (ABNT, 2011) e tração na flexão de acordo com a NBR 12142 (ABNT, 2010).

Para os traços iniciais elaborados com brita 1, foram feitos corpos de prova cilíndricos (100x200mm) que foram ensaiados a compressão axial. Não foram realizados ensaios de tração na flexão para esses traços uma vez que se tratava de ensaios preliminares e buscou-se reduzir o volume de concreto nesta etapa.

Assim, buscou-se na bibliografia autores que realizaram a comparação entre os ensaios de resistência para que fosse possível estimar as resistências a tração por compressão diametral e na flexão por meio da resistência a compressão.

Dessa forma, foi possível estimar os resultados de resistência a tração indireta pela equação de Gaedicke *et al.* (2016) e na flexão pela equação Chhorn *et al.* (2018).

Além disso, ao analisar as equações foi possível verificar que as resistências a tração na flexão tendem a ser superiores que as resistências a compressão diametral.

Ou seja, caso os resultados de tração por compressão diametral obtidos fossem maiores que 1 e 2MPa (para pedestres e para veículos leves, respectivamente), o concreto estaria de acordo com a norma NBR 16416 (ABNT, 2015).

Dessa forma, também foi possível prever que traços que obtivessem valores acima de 7 e 16MPa aproximadamente teriam uma grande probabilidade de atender aos requisitos mínimos de resistência a tração imposto de pela norma para tráfego de pessoas e de veículos leves, respectivamente.

Para os traços elaborados com brita 0 (pedrisco) foram realizados os ensaios de compressão axial e de compressão diametral sendo assim possível comparar e verificar se a equação sugerida por Gaedicke *et al.* (2016) apresentava resultados próximos aos obtidos em laboratório.

3.3. PROCEDIMENTOS LABORATORIAIS

Para a utilização dos agregados de forma uniforme, todos foram secos ao sol por pelo menos 3 dias para que ocorresse a evaporação de toda água superficial e a aproximação da umidade dos materiais para zero.

Antes da produção de cada traço foi realizado o ensaio a fim de medir a umidade presente nos agregados antes de serem acrescentados ao concreto.

Todos os traços produzidos tinham em sua composição um peso de água proporcional a 28% do peso de cimento empregado mais a água que era necessária para completar a absorção dos agregados até a saturação.

Esse cálculo foi feito conforme Vieira *et al.* (2020), que também considerou a água de acordo com a necessidade para a saturação dos agregados.

Isso garantiu uniformidade na condição dos concretos frescos obtidos, em que todos os traços tinham aspecto visual semelhante e brilhoso. Confirmou-se por análise tátil-visual que não faltava ou sobrava água (o concreto não se desprendia quando apertado na mão e a pasta não escorria dos agregados quando apertado na mão, respectivamente).

Para a confirmação de que todos os concretos produzidos apresentavam a mesma trabalhabilidade foi realizado o ensaio de abatimento do tronco de cone

previamente em todos os traços, de acordo com norma NBR 16889 (ABNT, 2020) e seguindo o procedimento da NBR 16886 (ABNT, 2020) para ensaios em concreto fresco. Nenhum dos traços realizados apresentou abatimento superior a dois centímetros e isso vai ao encontro do que é citado por Garozi (2019).

Nos procedimentos de mistura, optou-se por adaptar o procedimento adotado por Silva (2019) alterando o processo de adição de água e o tempo que a betoneira permaneceu parada. O processo de mistura consistiu em:

- Lavagem da betoneira;
- Espera de 2 min para a remoção do excesso de água com a boca da betoneira virada para baixo;
- Adição dos agregados mais a água de absorção;
- Mistura por 1 minuto;
- Adição do cimento (mais a sílica, quando presente) mais a água de hidratação;
- Mistura por 2 minutos;
- Parada da mistura e limpeza das paredes da betoneira por 30 segundos;
- Adição do superplastificante;
- Mistura por 2 minutos;
- Parada para análise do traço e finalização;

As alterações foram realizadas para que o agregado tivesse contato com a água de hidratação apenas após absorver toda a água de absorção e para que o concreto fresco ficasse o mínimo tempo possível parado na betoneira.

Todos os traços foram batidos em dias que apresentavam clima semelhante (ensolarado) e no mesmo horário (próximo às 18h).

A moldagem dos corpos de prova foi realizada adaptando o método proposto pela norma NBR 5738 (ABNT, 2015) uma vez que a norma não se aplica a concretos de abatimento igual a zero.

Os corpos de prova foram moldados em duas camadas aproximadamente iguais mais a camada de finalização. As duas primeiras camadas receberam quinze

golpes de haste metálica e foram vibradas durante dez segundos cada. A camada de finalização consistiu no preenchimento do espaço restante e posterior adensamento e regularização da superfície com a passagem da haste sobre ela como um rolo.

Esse método foi adaptado a partir do sugerido por Silva (2019) e das experiências e testes realizados no laboratório pelo autor. Foi possível verificar que um número superior de golpes causava danos ao agregado e que um tempo superior de vibração causava colmatação dos traços mais fortes.

Após a moldagem e compactação todos os corpos de prova foram cobertos por plástico filme a fim de prevenir qualquer perda de água que pudesse ocorrer. Eles permaneceram em um ambiente fechado onde não ocorria a incidência de sol diretamente por pelo menos 24 horas.

Após esse período os corpos de prova foram nomeados e movidos para a câmara úmida, de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2015), com temperatura que variava entre $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa do ar média de 95%.

No dia da ruptura dos corpos de prova (7 ou 28 dias), eles foram removidos da câmara úmida, esperou-se 1 hora para que a água superficial evaporasse e assim fosse possível realizar o capeamento. Após esse processo os corpos de prova foram devolvidos a câmara úmida onde permaneceram até o momento da ruptura, realizada no mesmo dia.

O capeamento dos corpos de prova foi realizado com enxofre uma vez que ele foi o material que apresentou os melhores resultados de resistência e a menor dispersão dos resultados sendo o método com menor coeficiente de variação.

Antes da produção dos traços propostos, foi realizado um estudo para analisar a influência do capeamento no ensaio de compressão axial. Esse estudo foi importante para selecionar o melhor método, tanto quanto ao desempenho mecânico, quanto a dispersão dos valores apresentados.

A fim de avaliar os cinco métodos de capeamento disponíveis, foram produzidos cinco lotes de dez corpos de prova cilíndricos cada lote. O traço utilizado para os lotes está apresentado na Tabela 4.

Tabela 4: Traço em Massa Proposto para Análise dos Métodos de Capeamento

Materiais	Cimento	Pedrisco	Água	SP
Traço	1	5	0,39	0,05 SPC

Fonte: Autor.

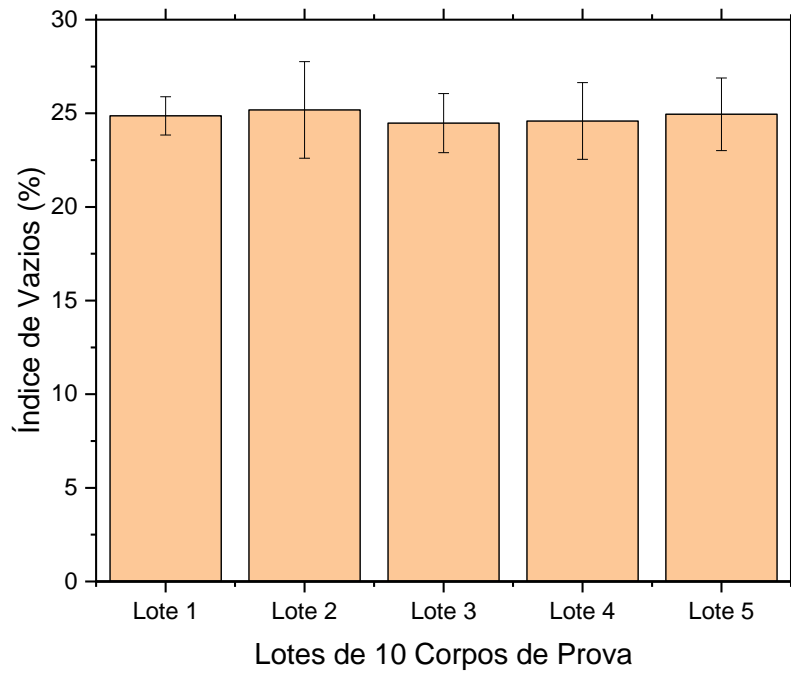
Além disso, todos os lotes seguiram o mesmo procedimento para garantir que não houve influência da mistura na dispersão dos resultados, foram selecionados dois corpos de prova de cada lote, totalizando os dez que seriam ensaiados para cada método.

Em todos os lotes foram selecionados os corpos de prova que correspondiam ao primeiro, quarto, sétimo e décimo a serem moldados para que fosse realizado os ensaios de massa específica, índice de vazios e permeabilidade, estes resultados estão apresentados nas Figura 8, Figura 9 e Figura 10, respectivamente.

Essa seleção foi realizada para analisar se existia uniformidade nos resultados obtidos entre os corpos de prova que foram selecionados para cada um dos métodos de capeamento.

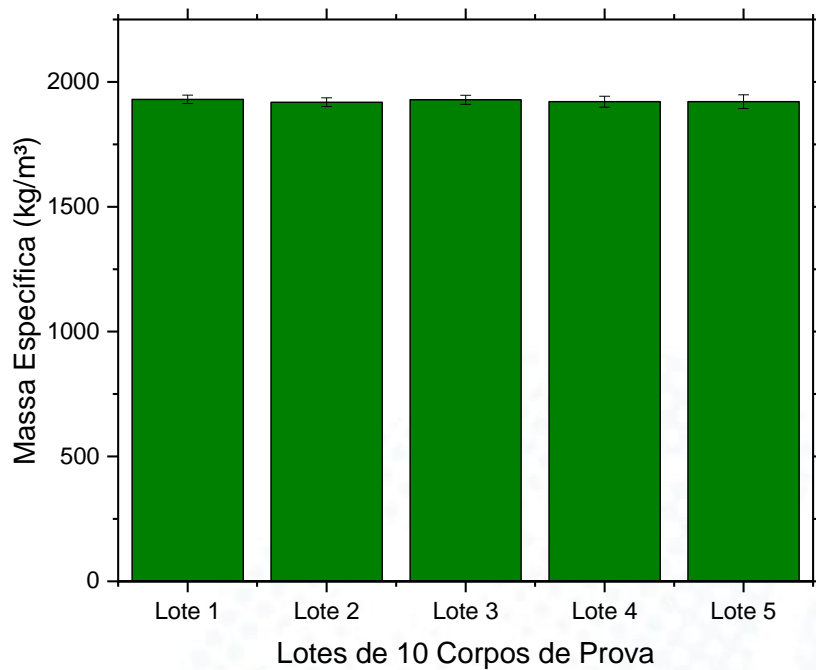
O lote 1 corresponde aos corpos de prova que foram capeados com pasta de cimento, o lote 2 corresponde aos corpos de prova que foram capeados com enxofre, o lote 3 corresponde aos corpos de prova que foram capeados com gesso, o lote 4 corresponde aos corpos de prova capeados com os moldes de madeirite e o lote 5 foi rompido sem capeamento.

Figura 8: Índice de Vazios – Métodos de Capeamento



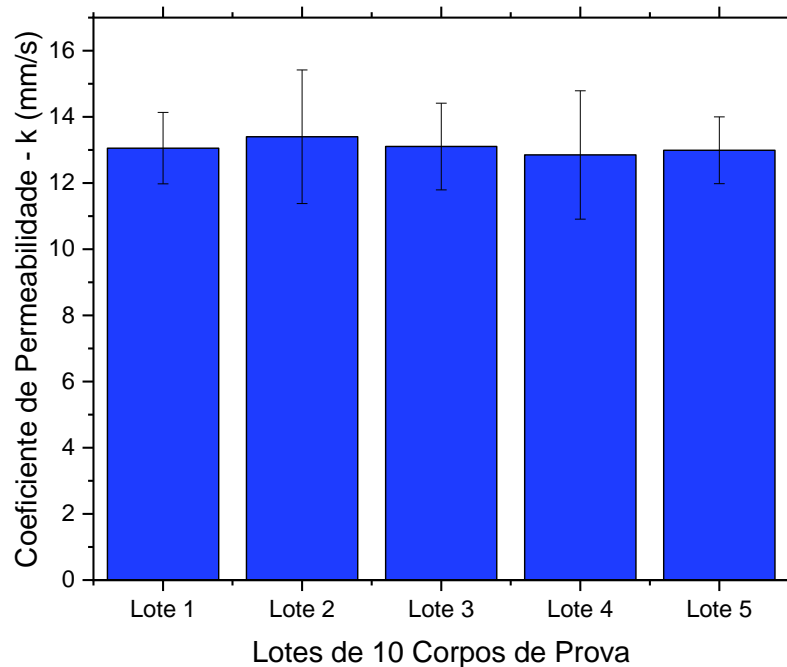
Fontes: Autor.

Figura 9: Massa Específica – Métodos de Capeamento



Fontes: Autor.

Figura 10: Permeabilidade – Métodos de Capeamento



Fonte: Autor.

A análise dos gráficos permite concluir que não existe discrepância quanto as características drenantes dos lotes, ou seja, qualquer diferença no resultado apresentado de resistência a compressão axial existe devido a mudança do método de capeamento.

Isso foi confirmado estatisticamente por meio da Análise de Variância (ANOVA), apresentada nas Tabelas 5, 6 e 7. Foram comparados os resultados obtidos nos corpos de prova que foram, posteriormente, capeados, para verificar se existia diferença entre eles.

Tabela 5: ANOVA – Índice de Vazios das Amostras

ANOVA	F	valor-P	F crítico
Amostras dos Métodos	0,088671	0,984616	3,055568

Fonte: Autor.

Tabela 6: ANOVA – Massa Específica das Amostras

ANOVA	F	valor-P	F crítico
Amostras do Método	0,604289	0,661544	2,578739

Fonte: Autor.

Tabela 7: ANOVA – Coeficiente de Permeabilidade das Amostras

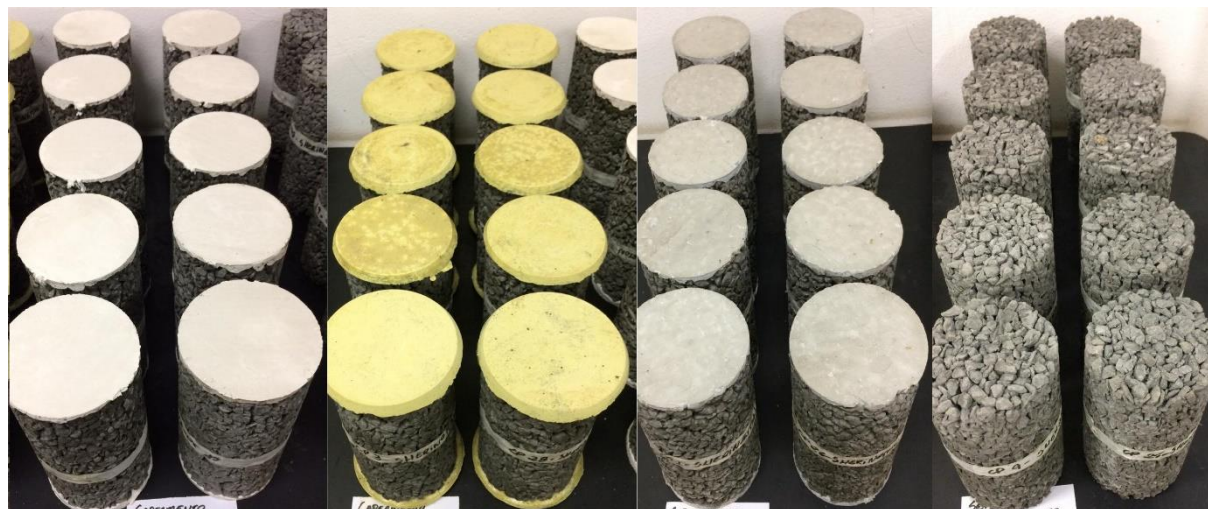
ANOVA	F	valor-P	F crítico
Amostras do Método	0,069585	0,990225	3,055568

Fonte: Autor.

A partir da Análise de Variância das três características nota-se que em todos os casos o valor de “F” foi menor que o de “F crítico” e que o “valor-P” foi superior a 0,05. Isso garante com 95% de certeza que não existe diferença entre os corpos de prova utilizados em cada um dos métodos, ou seja, são estatisticamente iguais.

A Figura 11 ilustra os métodos de capeamento utilizados. Da esquerda para a direita: gesso, enxofre, pasta de cimento, sem capeamento e sem capeamento com madeirite.

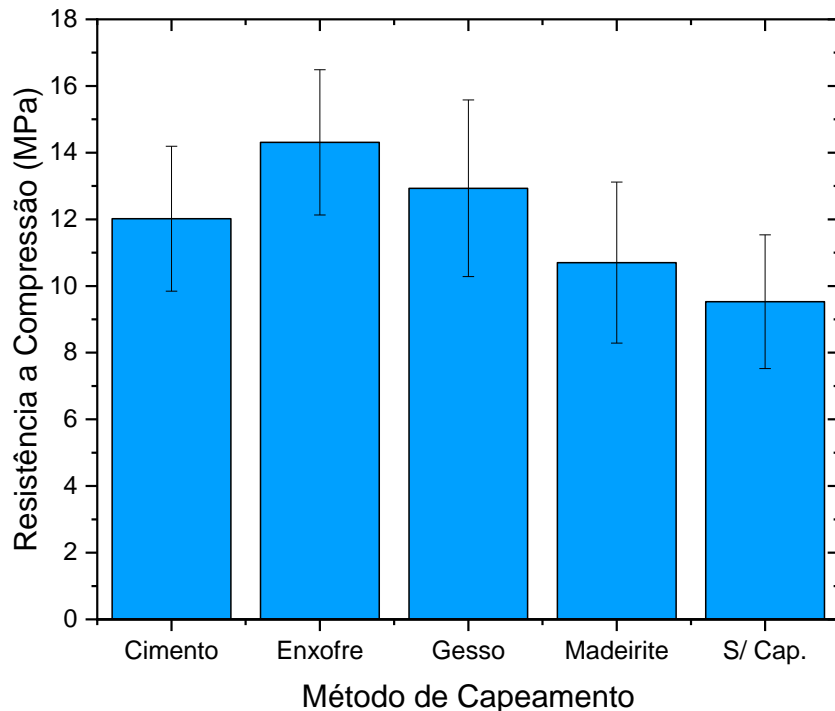
Figura 11: Métodos de Capeamento



Fonte: Autor.

A resistência a compressão axial obtida em cada um dos métodos está apresentada na Figura 12 e a análise estatística dos resultados na Tabela 8, que apresenta média, desvio e coeficiente de variação dos grupos de 10 corpos de prova.

Figura 12: Resistência a Compressão Axial – Métodos de Capeamento



Fonte: Autor.

Tabela 8: Análise Estatística Geral dos Métodos de Capeamento

Método	Pasta de Cimento	Enxofre	Gesso	Madeirite	Sem Capeamento
Média (MPa)	12,02	14,31	12,93	10,70	9,53
Desvio Padrão (MPa)	2,17	2,18	2,65	2,42	2,01
CV (%)	18,10	15,22	20,49	22,58	21,06

Fonte: Autor.

É possível verificar o método de capeamento por enxofre além de apresentar o melhor resultado de compressão axial também foi o método que apresentou menor coeficiente de variação dos resultados.

Isso ocorreu provavelmente pois o enxofre se apresenta em estado líquido durante o capeamento, preenchendo melhor, e de maneira mais uniforme, os poros da superfície dos corpos de prova.

Para a confirmação estatística dos resultados apresentados, foi também realizada a Análise de Variância para os resultados de resistência a compressão, como apresentado na Tabela 9.

Tabela 9: ANOVA – Resistência a Compressão dos Métodos

ANOVA	F	valor-P	F crítico
Amostras dos Métodos	6,609327	0,000284	2,578739

Fonte: Autor.

A partir da análise dos resultados é possível verificar que “F” foi maior que “F crítico” e que o “valor-P” foi inferior a 0,05. Isso indica que existe diferença entre os resultados obtidos entre os métodos, ou seja, não são estatisticamente iguais.

Assim, fica comprovado que o método de capeamento tem influência no resultado que será obtido no ensaio de resistência a compressão axial, e que, quando capeados com enxofre, os resultados são superiores e mais uniformes.

3.4. DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DOS TRAÇOS

Todos os traços elaborados foram feitos com uma adaptação do método proposto por Helene e Terzian (1992) em que a proposta é realizar, com a mesma composição de materiais, três proporções diferentes de relação cimento/agregados.

Essas três proporções são divididas entre: um traço “pobre”, um traço “médio” e um traço “rico” em consumo de cimento. Isso permite comparar fatores como a resistência, a permeabilidade, a viabilidade econômica e a composição do concreto.

Para uma análise de viabilidade econômica desses traços, foi utilizado o cálculo do consumo de cimento proposto por Oliveira *et al.* (2017), adaptado a partir da “Lei de Molinari”, para concretos com índice de vazios relevantes, apresentado na Equação 4.

$$C = \frac{1000 - I}{\frac{1}{\mu_c} + \frac{a}{\mu_a} + \frac{b}{\mu_b} + \frac{a/c}{\mu_{H2O}}} \quad (4)$$

Onde:

C: Consumo de cimento (kg/m^3);
I: índice de vazios do concreto (0,10 – 0,35);
a: Quantidade de areia no traço em massa (kg);
b: Quantidade de brita no traço em massa (kg);
a/c: Relação água/cimento em massa (kg);
 μ_a : Massa específica da areia (g/cm^3);
 μ_b : Massa específica da brita (g/cm^3);
 $\mu_{\text{H}_2\text{O}}$: Massa específica da água (g/cm^3);

A elaboração dos traços foi dividida em etapas. Primeiramente buscou-se avaliar a viabilidade da produção de um traço de concreto permeável com o maior coeficiente de permeabilidade possível, dessa forma, foi utilizada a brita de maior granulometria (brita 1), uma vez que a mesma, em seu estado natural, possui maior índice de vazios.

Por meio da avaliação dos resultados desses traços, buscou-se melhorar o desempenho mecânico dos mesmos pela adição de materiais finos (areia) em sua composição. A adição foi feita em medidas de 5 e 10% em relação a massa de cimento empregada.

A intenção ao realizar essas adições foi verificar a sua influência na resistência do concreto e qual seria a perda de permeabilidade resultante do acréscimo desse material fino.

Foram produzidos seis corpos de prova para cada traço com brita 1, onde os dois primeiros eram ensaiados para caracterização do concreto permeável (massa específica, índice de vazios e permeabilidade) e descartados; e os quatro restantes eram ensaiados a resistência mecânica (compressão axial).

Uma vez que os resultados de resistência não foram satisfatórios para o emprego do concreto de maneira ampla, foi realizada a troca do agregado graúdo utilizado (de brita 1 para brita 0). Dessa forma, foi possível analisar a influência que o tamanho do agregado tinha sobre as características do concreto.

Foram produzidos dez corpos de prova para cada traço com brita 0, onde os dois primeiros eram ensaiados para caracterização do concreto permeável (massa específica, índice de vazios e permeabilidade) e descartados; e os oito restantes

eram ensaiados a resistência mecânica (quatro para compressão axial e quatro para compressão diametral).

De forma semelhante aos primeiros traços, foi adicionada areia as composições em medidas de 5 e 10% a fim de buscar um traço que pudesse atender aos requisitos mínimos de norma NBR 16416 (ABNT, 2015) para veículos leves.

Uma vez atendidos os requisitos mínimos exigidos pela norma, adicionou-se sílica aos traços estudados também na proporção de 5 e 10% sobre o peso de cimento, no lugar da areia. A intenção dessa adição foi verificar se o comportamento da sílica era melhor que o da areia.

A partir dessa adição foi possível analisar a influência dos materiais finos nas características do concreto permeável. Os traços elaborados estão apresentados na Tabela 10 em função da massa de cimento. Por simplificação da nomenclatura, os traços que têm em seu nome a terminologia “B0” são compostos por brita 0 e os que contêm em seu nome “B1” são compostos por brita 1. Além disso, o número seguinte ao traço refere-se à porcentagem de finos e a letra da sequência, “a” ou “s”, indicam areia ou sílica, respectivamente.

Tabela 10: Traços em Massa Elaborados

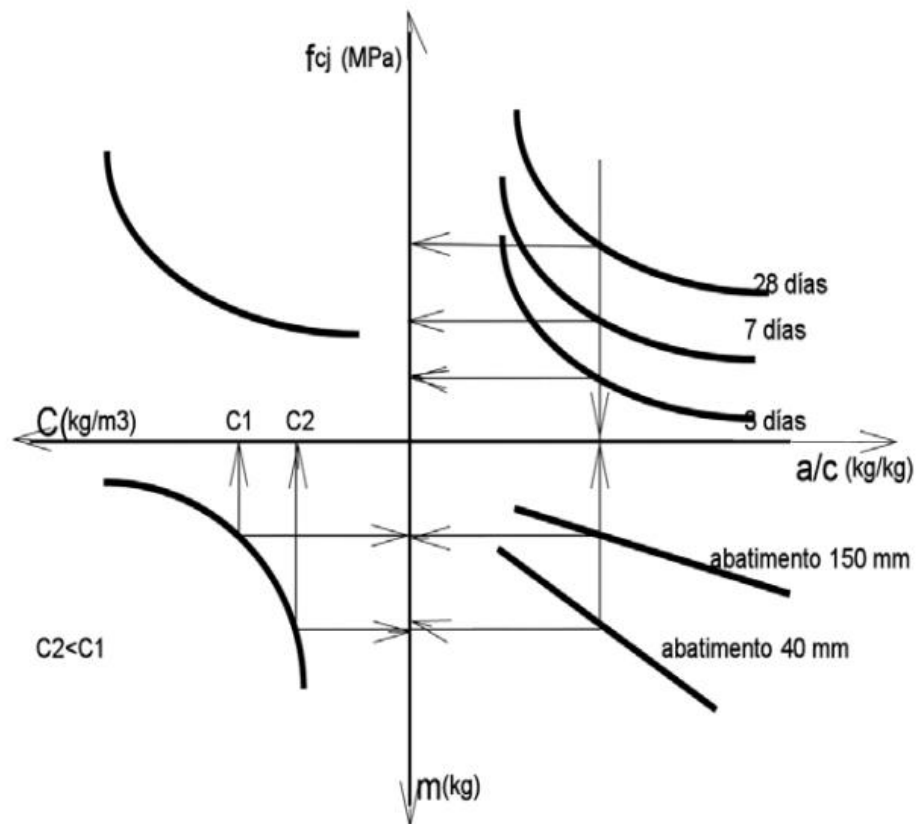
Nomenclatura	Cimento	Brita (m)	Areia	Sílica	Água	SP
B1 - Ref	1	3,5	0	0	0,35	0,005
		5,0	0	0	0,39	0,005
		6,5	0	0	0,42	0,005
B1 - 5a	1	3,5	0,05	0	0,35	0,005
		5,0	0,05	0	0,39	0,005
		6,5	0,05	0	0,42	0,005
B1 - 10a	1	3,5	0,10	0	0,35	0,005
		5,0	0,10	0	0,39	0,005
		6,5	0,10	0	0,42	0,005
B0 - Ref	1	3,5	0	0	0,35	0,005
		5,0	0	0	0,39	0,005
		6,5	0	0	0,42	0,005
B0 - 5a	1	3,5	0,05	0	0,35	0,005
		5,0	0,05	0	0,39	0,005
		6,5	0,05	0	0,42	0,005
B0 - 10a	1	3,5	0,10	0	0,35	0,005
		5,0	0,10	0	0,39	0,005
		6,5	0,10	0	0,42	0,005
B0 - 5s	1	3,5	0	0,05	0,35	0,005
		5,0	0	0,05	0,39	0,005
		6,5	0	0,05	0,42	0,005
B0 - 10s	1	3,5	0	0,10	0,35	0,005
		5,0	0	0,10	0,39	0,005
		6,5	0	0,10	0,42	0,005

Fonte: Autor.

Vale ressaltar que a relação água/cimento apresentada na Tabela 10 é referente a água necessária para a absorção do agregado mais 28% de água adicionada em relação ao peso de cimento.

Por fim, para a melhor visualização dos resultados, adaptou-se o diagrama de dosagem de Helene e Tutikian (2011), demonstrado na Figura 13, substituindo o fator água/cimento, que reflete no abatimento do concreto (constante e igual a zero nos três traços), pela permeabilidade dos traços.

Figura 13: Diagrama de Dosagem de Concreto Comum



Fonte: Helene e Tutikian (2011)

Dessa forma, é possível avaliar a influência dos traços nas características mais importantes do concreto permeável (coeficiente de permeabilidade e resistência mecânica) e verificar sua viabilidade. Esse diagrama também nos permite buscar traços intermediários a fim de ajustar, de acordo com a necessidade, o traço utilizado.

Essa é uma adaptação feita para que fosse possível avaliar simultaneamente a relação da resistência a compressão axial e do coeficiente de permeabilidade com o traço em massa e o consumo de cimento. Essa comparação permite uma visão mais ampla da relação entre o enriquecimento do traço com o ganho de resistência e a perda de permeabilidade.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Todos os resultados obtidos pelo autor estão apresentados no Apêndice A. Esses resultados são os valores obtidos para cada corpo de prova em cada um dos ensaios realizados. Para simplificação da apresentação dos dados nesse capítulo, estão presentes as médias, os desvios-padrão e os coeficientes de variação dos resultados, posteriormente calculados pelo autor.

Além disso, para uma análise estatística que permitisse analisar a influência das misturas nas características estudadas e quais geraram diferenciação entre si, foi realizada uma Análise de Variância para que fosse possível ter uma visão geral e um Teste de Tukey de Comparação Múltipla.

Ambos os testes foram realizados com o nível de 5% de probabilidade, ou seja, 95% de chance de certeza nos resultados obtidos.

Dessa forma foi possível verificar quais misturas obtiveram resultados estatisticamente diferentes, ou seja, quais misturas causaram diferenças nos resultados.

A apresentação dos resultados obtidos será dividida em três etapas:

Etapa 1) a caracterização e comparação dos traços elaborados em relação a massa específica, índice de vazios e permeabilidade;

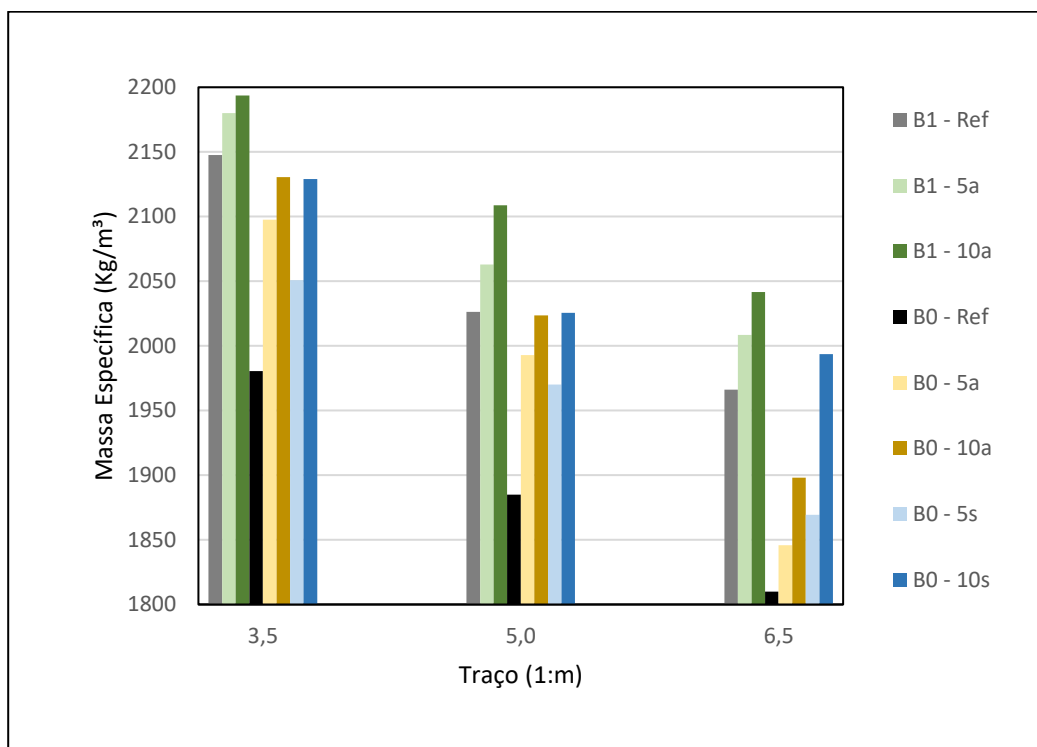
Etapa 2) a análise dos resultados de compressão axial, a análise dos resultados de compressão diametral e comparação com os valores estimados por Gaedicke *et al.* (2016), além da estimativa dos valores de resistência a tração por flexão pela equação proposta por Chhorn *et al.* (2018);

Etapa 3) a elaboração dos diagramas de dosagem adaptados a fim ajustar a produção do melhor traço que se adeque a um determinado uso.

a. CARACTERIZAÇÃO DOS TRAÇOS

A massa específica obtida em todos os traços elaborados está apresentada na Figura 14. A partir da análise da figura é possível notar que todos os traços que foram realizados com brita 1 obtiveram valores superiores de massa específica em relação aos traços de brita 0.

Figura 14: Massa Específica – Traços

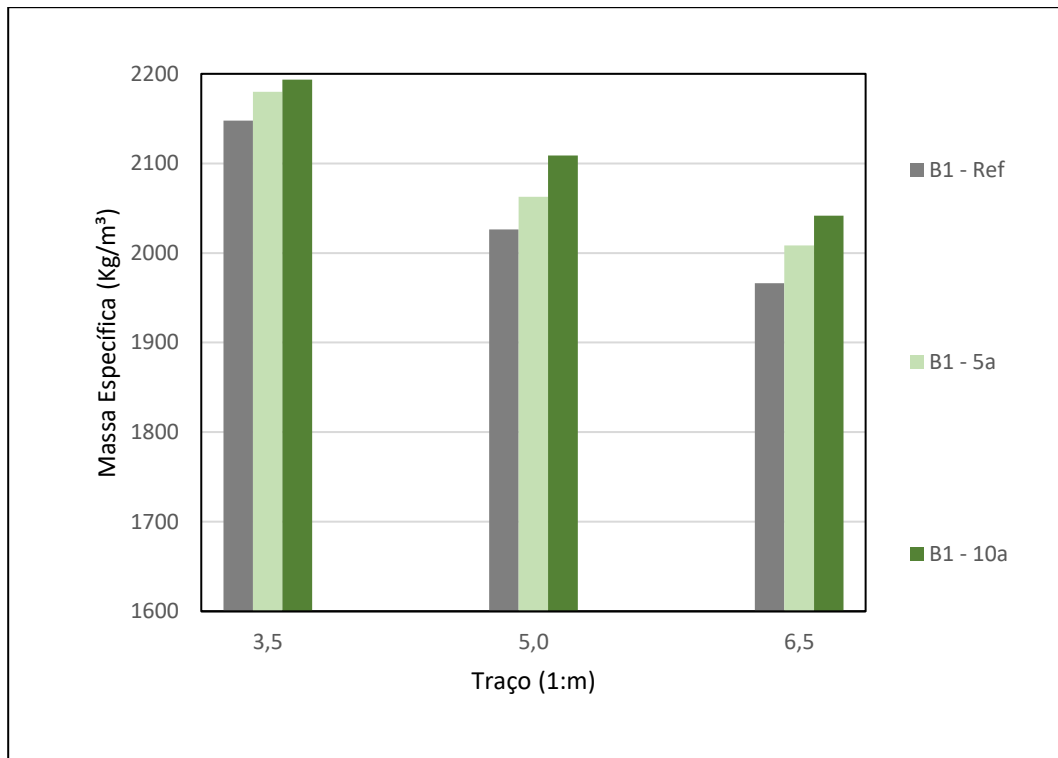


Fonte: Autor.

Nota-se que nenhum dos traços obteve massa específica menor que 1600Kg/m^3 , ou seja, todos estavam de acordo com a solicitação mínima exigida pela norma NBR 16416 (ABNT, 2015).

Os primeiros avaliados foram os resultados referentes aos traços que continham brita 1 e as suas adições de areia, como representado na Figura 15.

Figura 15: Massa Específica - Traços de Brita 1



Fonte: Autor.

É possível verificar que à medida que os traços vão partindo de um traço mais rico para um mais pobre em consumo de cimento, a massa específica diminui.

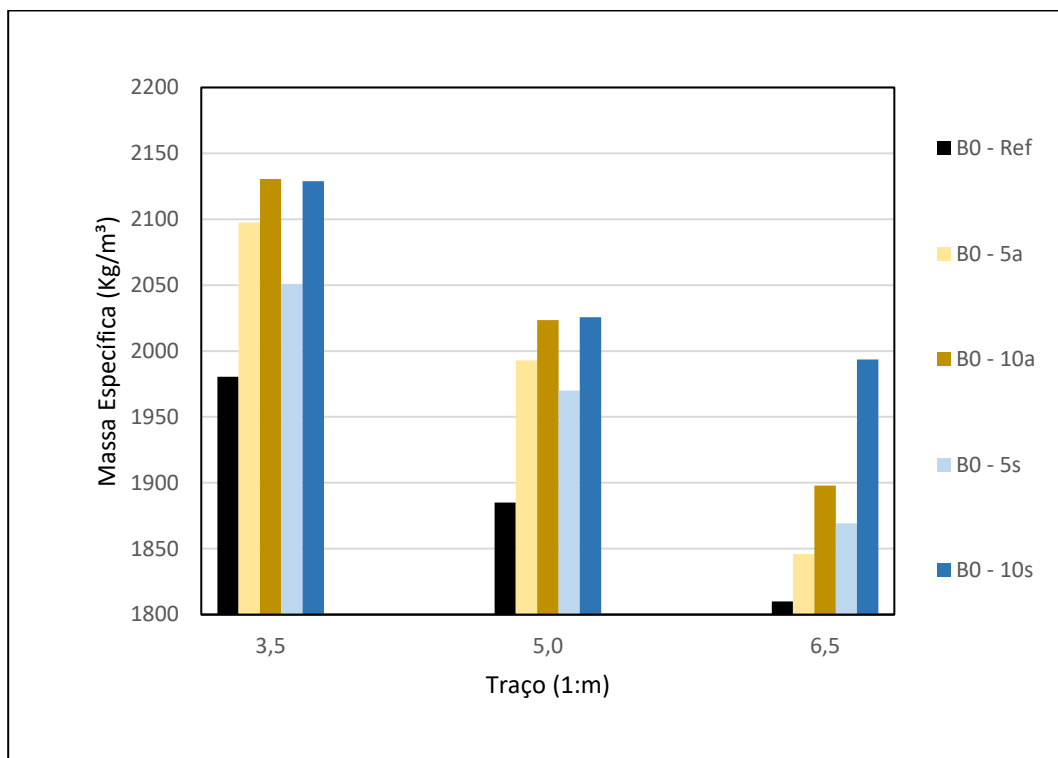
Em relação às misturas de referência, o traço 1:3,5 apresentou massa específica 5,98% maior em relação ao traço 1:5 e 9,23% maior relação ao 1:6,5. As misturas com 5% de areia do traço 1:3,5 teve a massa específica 5,68% maior em relação ao traço 1:5 e 8,53% maior relação ao 1:6,5. Já as misturas com 10% de areia o traço 1:3,5 foi 4,03% e 7,44% maior que os traços 1:5 e 1:6,5, respectivamente.

Ao analisar o traço de referência de 1:3,5 com o mesmo traço acrescido de 5 e 10% de areia pode-se observar que a massa específica aumentou 1,51% e 2,14%, respectivamente. Quando foi acrescentado 5 e 10% de areia no traço 1:5, pode-se observar um aumento de 1,8 e 4,06%, respectivamente, em relação à mistura de referência de 1:5. Já o traço 1:6,5 apresentou 2,16 e 3,84% de aumento na massa específica ao acrescentar 5 e 10% de areia, respectivamente.

Portanto, as adições de areia aos traços apresentaram maiores valores de massa específica quanto maior a quantidade de agregados finos, uma vez que esses finos devem preencher os vazios presentes na composição do concreto.

O segundo passo foi realizar a mesma avaliação para os traços que continham brita 0 e as adições de areia e sílica, apresentado na Figura 16.

Figura 16: Massa Específica – Traços Brita 0



Fonte: Autor.

No geral, todos os traços com adições obtiveram acréscimos em sua massa específica em relação ao traço de referência.

Como é possível verificar também pelo gráfico da Figura 23, ambas as adições apresentaram comportamentos semelhantes à medida que o consumo de cimento diminuía.

Em relação às misturas de referência, o traço 1:3,5 apresentou massa específica 5,07% maior em relação ao traço 1:5 e 9,43% maior relação ao 1:6,5. As misturas com 5% de areia do traço 1:3,5 teve a massa específica 5,26% maior em relação ao traço 1:5 e 13,64% maior relação ao 1:6,5. Já as misturas com 10% de

areia o traço 1:3,5 foi 5,29% e 12,25% maior que os traços 1:5 e 1:6,5, respectivamente.

Para as misturas com 5% de sílica do traço 1:3,5 teve a massa específica 4,11% maior em relação ao traço 1:5 e 9,72% maior relação ao 1:6,5. Já as misturas com 10% de sílica o traço 1:3,5 foi 5,10% e 6,79% maior que os traços 1:5 e 1:6,5, respectivamente.

Ao analisar o traço de referência de 1:3,5 com o mesmo traço acrescido de 5 e 10% de areia pode-se observar que a massa específica aumentou 5,91% e 7,58%, respectivamente. Quando foi acrescentado 5 e 10% de areia no traço 1:5, pode-se observar um aumento de 5,72 e 7,35%, respectivamente, em relação à mistura de referência de 1:5. Já o traço 1:6,5 apresentou 1,99 e 4,87% de aumento na massa específica ao acrescentar 5 e 10% de areia, respectivamente.

Quando analisado o traço de referência de 1:3,5 com o mesmo traço acrescido de 5 e 10% de sílica pode-se observar que a massa específica aumentou 3,56% e 7,50%, respectivamente. Quando foi acrescentado 5 e 10% de sílica no traço 1:5, pode-se observar um aumento de 4,51 e 7,46%, respectivamente, em relação à mistura de referência de 1:5. Já o traço 1:6,5 apresentou 3,28 e 10,15% de aumento na massa específica ao acrescentar 5 e 10% de sílica, respectivamente.

O resultado da massa específica para o traço de 1:6,5, com areia e sílica, não condiz com o esperado. Uma vez que a massa específica da areia é superior à da sílica, esperava-se que a massa específica da mistura com sua adição fosse também superior.

Uma possível explicação para esse fato seria a areia ter uma menor união com a pasta à medida que o traço foi empobrecendo. Isso foi visualizado pelo autor no momento da mistura dos traços uma vez que era possível verificar a presença de parte da areia nas laterais da betoneira. Fato esse que não ficou visível nos traços que continham sílica.

A análise estatística dos traços elaborados se deu por meio da análise do coeficiente de variância dos resultados obtidos. Isso permitiu avaliar o quanto o desvio padrão médio das amostras variaram em relação a sua média. Essa análise é apresentada na Tabela 11.

Tabela 11: Massa Específica – Estatística

Traço	μ m (kg/m ³)	DP (kg/m ³)	CV (%)
B1 - REF - 3,5	2147,64	43,76	2,04
B1 - REF - 5,0	2026,39	57,94	2,86
B1 - REF - 6,5	1966,10	81,07	4,12
B1 - 5a - 3,5	2179,98	30,43	1,40
B1 - 5a - 5,0	2062,81	16,52	0,80
B1 - 5a - 6,5	2008,57	39,30	1,96
B1 - 10a - 3,5	2193,60	29,53	1,35
B1 - 10a - 5,0	2108,68	12,24	0,58
B1 - 10a - 6,5	2041,67	15,53	0,76
B0 - REF - 3,5	1980,49	8,78	0,44
B0 - REF - 5,0	1884,94	5,81	0,31
B0 - REF - 6,5	1809,85	24,04	1,33
B0 - 5a - 3,5	2097,57	22,28	1,06
B0 - 5a - 5,0	1992,84	1,58	0,08
B0 - 5a - 6,5	1845,88	4,59	0,25
B0 - 10a - 3,5	2130,54	28,77	1,35
B0 - 10a - 5,0	2023,53	31,02	1,53
B0 - 10a - 6,5	1897,99	3,83	0,20
B0 - 5s - 3,5	2050,90	6,62	0,32
B0 - 5s - 5,0	1969,99	4,55	0,23
B0 - 5s - 6,5	1869,24	19,72	1,05
B0 - 10s - 3,5	2128,98	9,63	0,45
B0 - 10s - 5,0	2025,63	3,47	0,17
B0 - 10s - 6,5	1993,57	12,15	0,61

Fonte: Autor.

O maior valor de coeficiente de variação obtido foi de 4,12% para o traço B1 – Ref – 6,5, para todos os outros traços esse valor foi menor ou igual a 2%. Isso indica que o método utilizado para elaboração dos traços foi eficiente à medida que não causou dispersão considerável dos resultados.

As variações citadas acima foram confirmadas pela Análise de Variância a fim de verificar se as adições resultaram em variações na massa específica. Esta análise é apresentada nas Tabela 12 e Tabela 13.

Tabela 12: ANOVA – Massa Específica Traços B1

ANOVA	F	valor-P	F crítico
Adições	3,942059	0,058944	4,256495
Traço	24,75619	0,00022	4,256495
Conjunto	0,125495	0,969514	3,633089

Fonte: Autor.

Tabela 13: ANOVA – Massa Específica Traços B0

ANOVA	F	valor-P	F crítico
Adições	86,37701	3,61E-10	3,055568
Traço	381,0965	1,39E-13	3,68232
Conjunto	5,854386	0,001676	2,640797

Fonte: Autor.

A partir da análise da tabela dos traços de brita 1 é possível verificar que apenas a variação dos traços resultou na variação da massa específica, uma vez que foi a única a apresentar “F” maior que “F crítico” e “valor-P” inferior a 0,05.

Para os traços que continham brita 0, todos os três fatores apresentaram “F” superiores ao “F crítico” e “valor-P” inferior a 0,05. Isso indica que tanto os diferentes traços quanto os acréscimos de areia e sílica influenciaram nos resultados obtidos, que foram considerados estatisticamente, diferentes.

Para a análise comparativa, da massa específica das misturas, realizou-se um teste de Tukey, onde foi possível comparar, em cada um dos traços, as misturas realizadas calculando-se a Diferença Mínima Significativa (DMS), fator pelo qual são comparadas as médias obtidas em cada uma das misturas. O DMS teve o valor de 117,21 para as misturas de brita 1 e de 48,65 para as de brita 0.

Essa análise é apresentada para a brita 1 na Tabela 14 para o traço 1:3,5; na Tabela 15 para o traço 1:5,0 e na Tabela 16 para 1:6,5.

Tabela 14: Teste de Tukey – Massa Específica – Brita 1 – Traço 1:3,5

Traço 1:3,5	Média 1	Média 2	Mód da Média	Dif. Sig.
Ref - 5a	2147,64	2179,98	32,34	N
Ref - 10a	2147,64	2193,60	45,96	N
5a - 10a	2179,98	2193,60	13,62	N

Fonte: Autor.

Tabela 15: Teste de Tukey – Massa Específica – Brita 1 – Traço 1:5,0

Traço 1:5,0	Média 1	Média 2	Mód da Média	Dif. Sig.
Ref - 5a	2026,39	2062,81	36,41	N
Ref - 10a	2026,39	2108,68	82,28	N
5a - 10a	2062,81	2108,68	45,87	N

Fonte: Autor.

Tabela 16: Teste de Tukey – Massa Específica – Brita 1 – Traço 1:6,5

Traço 1:6,5	Média 1	Média 2	Mód da Média	Dif. Sig.
Ref - 5a	1966,10	2008,57	42,46	N
Ref - 10a	1966,10	2041,67	75,57	N
5a - 10a	2008,57	2041,67	33,10	N

Fonte: Autor.

Como é possível verificar pelas tabelas, nenhuma das comparações resultou em diferença significativa na massa específica. Isso confirma o resultado obtido durante o ANOVA, no qual apenas a variação dos traços causou diferenças.

Para a brita 0, essa análise é apresentada na Tabela 17 para o traço 1:3,5; na Tabela 18 para o traço 1:5,0 e na Tabela 19 para 1:6,5.

Tabela 17: Teste de Tukey – Massa Específica – Brita 0 – Traço 1:3,5

Traço 1:3,5	Média 1	Média 2	Mód da Média	Dif. Sig.
Ref - 5a	1980,49	2097,57	117,07	S
Ref - 10a	1980,49	2130,54	150,05	S
Ref - 5s	1980,49	2050,90	70,41	S
Ref - 10s	1980,49	2128,98	148,49	S
5a - 10a	2097,57	2130,54	32,98	N
5a - 5s	2097,57	2050,90	46,66	N
5a - 10s	2097,57	2128,98	31,42	N
10a - 5s	2130,54	2050,90	79,64	S
10a - 10s	2130,54	2128,98	1,56	N
5s - 10s	2050,90	2128,98	78,08	S

Fonte: Autor.

Tabela 18: Teste de Tukey – Massa Específica – Brita 0 – Traço 1:5,0

Traço 1:5,0	Média 1	Média 2	Mód da Média	Dif. Sig.
Ref - 5a	1884,94	1992,84	107,91	S
Ref - 10a	1884,94	2023,53	138,59	S
Ref - 5s	1884,94	1969,99	85,05	S
Ref - 10s	1884,94	2025,63	140,69	S
5a - 10a	1992,84	2023,53	30,69	N
5a - 5s	1992,84	1969,99	22,85	N
5a - 10s	1992,84	2025,63	32,79	N
10a - 5s	2023,53	1969,99	53,54	S
10a - 10s	2023,53	2025,63	2,10	N
5s - 10s	1969,99	2025,63	55,64	S

Fonte: Autor.

Tabela 19: Teste de Tukey – Massa Específica – Brita 0 – Traço 1:6,5

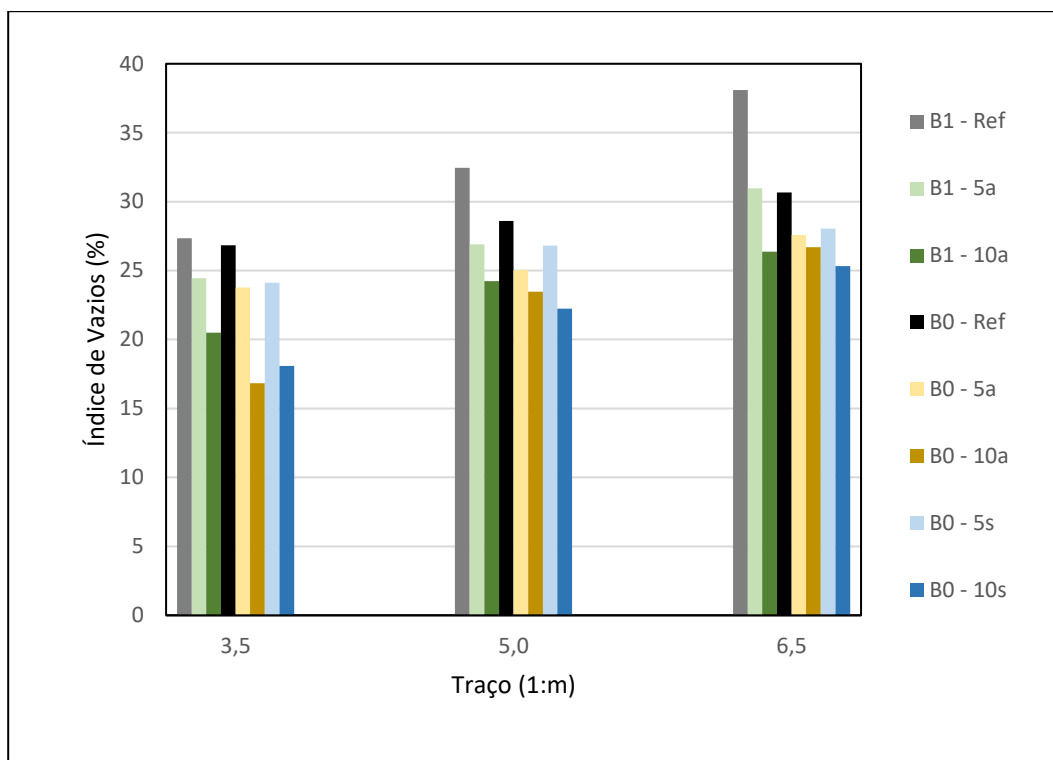
Traço 1:6,5	Média 1	Média 2	Mód da Média	Dif. Sig.
Ref - 5a	1809,85	1845,88	36,03	N
Ref - 10a	1809,85	1897,99	88,14	S
Ref - 5s	1809,85	1869,24	59,40	S
Ref - 10s	1809,85	1993,575	183,73	S
5a - 10a	1845,88	1897,99	52,11	S
5a - 5s	1845,88	1869,24	23,36	N
5a - 10s	1845,88	1993,575	147,70	S
10a - 5s	1897,99	1869,24	28,74	N
10a - 10s	1897,99	1993,575	95,59	S
5s - 10s	1869,24	1993,575	124,33	S

Fonte: Autor.

Para as misturas de brita 0 é possível verificar quais tiveram diferença significativa, em relação à massa específica, quando comparadas duas a duas. No geral, todas as misturas obtiveram resultados diferentes quando comparadas com as de referência.

O índice de vazios obtido em todos os traços elaborados está apresentado na Figura 17. A partir da análise da figura é possível notar que todos os traços que foram realizados com brita 1 obtiveram valores superiores de índice de vazios em relação aos traços de brita 0.

Figura 17: Índice de Vazios – Traços



Fonte: Autor.

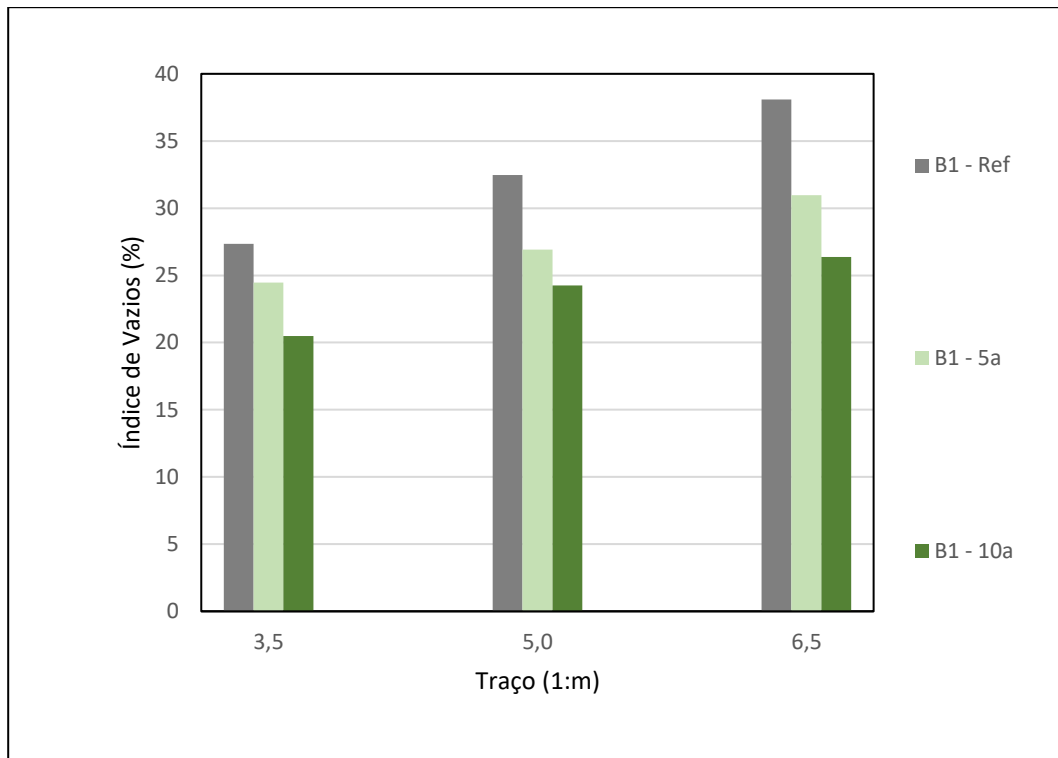
Nota-se que nenhum dos traços o índice de vazios foi inferior a 15%, o que indica que todos os traços estão de acordo com o que é sugerido pela bibliografia para o concreto permeável.

Além disso, é possível verificar que as adições de areia nos traços que continham brita 1 causaram a aproximação dos valores de índice de vazios aos valores obtidos com brita 0.

Nota-se também que em todas as misturas os traços mais pobres obtiveram pelo menos 25% de índice de vazios, o que indica que seria possível realizar mais adições de materiais finos a elas, pois o índice de vazios máximo para o concreto permeável é de 32% de acordo com a NBR 16416 (ABNT, 2015).

Os primeiros avaliados foram os resultados referentes aos traços que continham brita 1 e as suas adições de areia, como representado na Figura 18.

Figura 18: Índice de Vazios – Traços Brita 1



Fonte: Autor.

É possível verificar que à medida que se diminui o consumo de cimento, partindo de um traço rico para um traço pobre, o índice de vazios aumenta.

Para as adições de areia aos traços, obteve-se menores valores de índice de vazios quanto maior a quantidade de agregados finos, isso é explicado pois eles devem preencher os vazios presentes na composição do concreto.

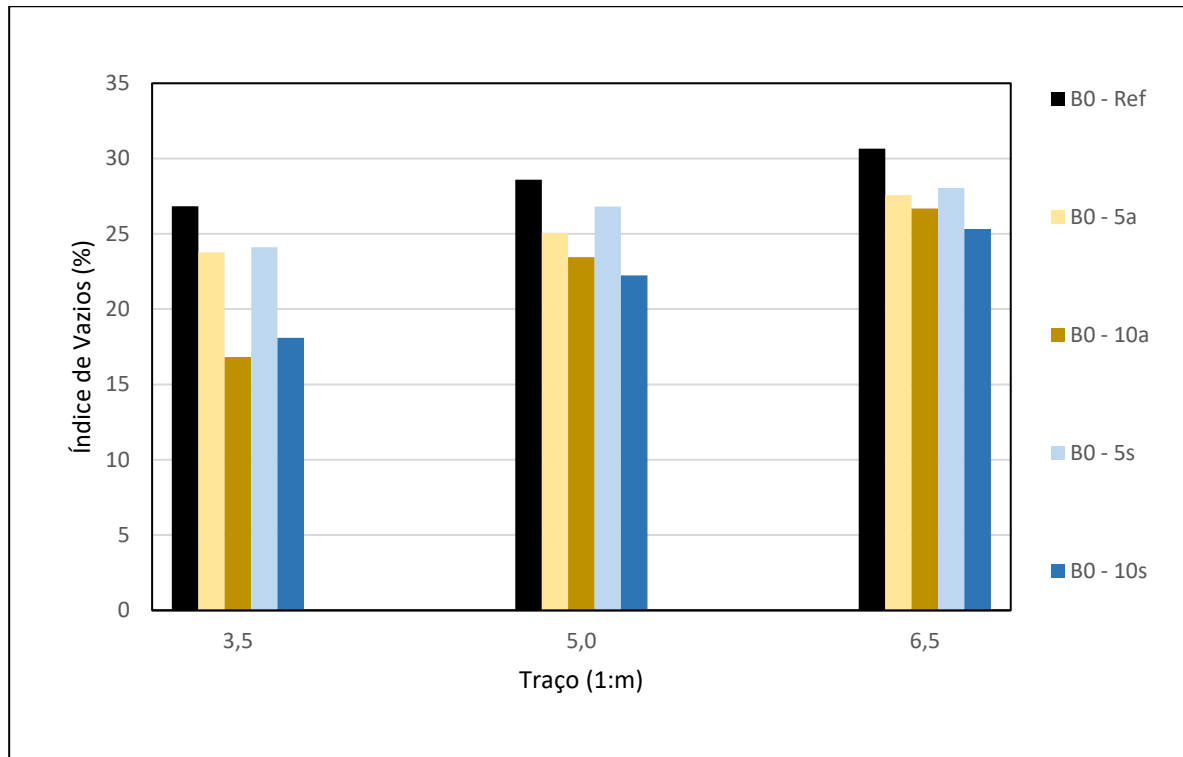
Em relação às misturas de referência, o traço 1:3,5 apresentou índice de vazios 15,74% menor em relação ao traço 1:5 e 28,18% menor relação ao 1:6,5. As misturas com 5% de areia do traço 1:3,5 teve o índice de vazios 9,11% menor em relação ao traço 1:5 e 21,01% menor relação ao 1:6,5. Já as misturas com 10% de areia o traço 1:3,5 foi 15,48% e 22,32% menor que os traços 1:5 e 1:6,5, respectivamente.

Ao analisar o traço de referência de 1:3,5 com o mesmo traço acrescido de 5 e 10% de areia pode-se observar que o índice de vazios diminuiu 10,59% e 25,08%, respectivamente. Quando foi acrescentado 5 e 10% de areia no traço 1:5, pode-se observar uma diminuição de 17,11 e 25,31%, respectivamente, em relação à mistura

de referência de 1:5. Já o traço 1:6,5 apresentou 18,71 e 30,73% de diminuição no índice de vazios ao acrescentar 5 e 10% de areia, respectivamente.

Em seguida, foi realizada a mesma avaliação para os traços que continham brita 0 e as adições de areia e sílica, apresentados na Figura 19.

Figura 19: Índice de Vazios – Traços Brita 0



Fonte: Autor.

Em relação às misturas de referência, o traço 1:3,5 apresentou índice de vazios 6,20% menor em relação ao traço 1:5 e 12,47% menor relação ao 1:6,5. As misturas com 5% de areia do traço 1:3,5 teve o índice de vazios 5,11% menor em relação ao traço 1:5 e 13,80% menor relação ao 1:6,5. Já as misturas com 10% de areia o traço 1:3,5 foi 28,27% e 36,94% menor que os traços 1:5 e 1:6,5, respectivamente.

Para as misturas com 5% de sílica do traço 1:3,5 teve o índice de vazios 10,01% menor em relação ao traço 1:5 e 14,00% menor relação ao 1:6,5. Já as misturas com 10% de sílica o traço 1:3,5 foi 18,67% e 28,54% menor que os traços 1:5 e 1:6,5, respectivamente.

Ao analisar o traço de referência de 1:3,5 com o mesmo traço acrescido de 5 e 10% de areia pode-se observar que o índice de vazios diminuiu 11,39% e 37,28%, respectivamente. Quando foi acrescentado 5 e 10% de areia no traço 1:5, pode-se observar uma diminuição de 12,41 e 17,98%, respectivamente, em relação à mistura de referência de 1:5. Já o traço 1:6,5 apresentou 10,02 e 12,95% de diminuição no índice de vazios ao acrescentar 5 e 10% de areia, respectivamente.

Quando analisado o traço de referência de 1:3,5 com o mesmo traço acrescido de 5 e 10% de sílica pode-se observar que o índice de vazios diminuiu 10,11% e 32,56%, respectivamente. Quando foi acrescentado 5 e 10% de sílica no traço 1:5, pode-se observar uma diminuição de 6,30 e 22,22%, respectivamente, em relação à mistura de referência de 1:5. Já o traço 1:6,5 apresentou 8,50 e 17,39% de diminuição no índice de vazios ao acrescentar 5 e 10% de sílica, respectivamente.

Todos os traços com adições obtiveram diminuição em seu índice de vazios em relação ao traço de referência. Também foi possível verificar que à medida que o traço foi de um consumo de cimento rico para um pobre, o índice de vazios aumenta significativamente.

A análise estatística dos traços elaborados se deu por meio da análise do coeficiente de variância dos resultados obtidos e da Análise de Variância. A primeira está apresentada na Tabela 20.

Tabela 20: Índice de Vazios – Estatística

Traço	Im (%)	DP (%)	CV (%)
B1 - REF - 3,5	27,35	0,12	0,44
B1 - REF - 5,0	32,46	0,59	1,80
B1 - REF - 6,5	38,08	0,05	0,12
B1 - 5a - 3,5	24,46	0,31	1,27
B1 - 5a - 5,0	26,91	0,27	1,02
B1 - 5a - 6,5	30,96	0,79	2,56
B1 - 10a - 3,5	20,49	0,57	2,77
B1 - 10a - 5,0	24,25	0,63	2,62
B1 - 10a - 6,5	26,38	0,29	1,09
B0 - REF - 3,5	26,83	0,51	1,91
B0 - REF - 5,0	28,61	0,50	1,75
B0 - REF - 6,5	30,66	0,72	2,33
B0 - 5a - 3,5	23,78	0,20	0,83
B0 - 5a - 5,0	25,06	0,94	3,74
B0 - 5a - 6,5	27,58	0,88	3,20
B0 - 10a - 3,5	16,83	0,25	1,47
B0 - 10a - 5,0	23,46	0,68	2,90
B0 - 10a - 6,5	26,69	0,10	0,37
B0 - 5s - 3,5	24,12	0,59	2,43
B0 - 5s - 5,0	26,80	0,83	3,11
B0 - 5s - 6,5	28,05	0,76	2,70
B0 - 10s - 3,5	18,10	0,87	4,81
B0 - 10s - 5,0	22,25	1,01	4,53
B0 - 10s - 6,5	25,32	0,04	0,14

Fonte: Autor.

O maior valor de coeficiente de variação obtido foi de 4,81% para o traço B0 – 10s – 3,5. Isso indica que o método utilizado para elaboração dos traços foi eficiente à medida que não causou dispersão dos resultados.

Além disso, os resultados da Análise de Variância são apresentados nas Tabela 21 e Tabela 22.

Tabela 21: ANOVA – Índice de Vazios Traços B0

ANOVA	F	valor-P	F crítico
Adições	551,765	3,85E-10	4,256495
Traço	407,8767	1,48E-09	4,256495
Conjunto	17,94295	0,000257	3,633089

Fonte: Autor.

Tabela 22: ANOVA – Índice de Vazios Traços B1

ANOVA	F	valor-P	F crítico
Adições	77,96702	7,49E-10	3,055568
Traço	132,4024	2,95E-10	3,68232
Conjunto	6,8193	0,000758	2,640797

Fonte: Autor.

Pela análise das tabelas é possível verificar que ambos os casos e para todos as características, “F” foi maior que “F crítico” e o “valor-P” foi inferior a 0,05. Isso indica que todos os valores são estatisticamente diferentes, ou seja, tanto as adições e o traço quanto o conjunto dos dois fatores influenciaram no índice de vazios.

Para a análise comparativa das misturas, realizou-se um teste de Tukey, onde foi possível comparar, em cada um dos traços, as misturas realizadas calculando-se a Diferença Mínima Significativa (DMS), fator pelo qual são comparadas as médias obtidas em cada uma das misturas. O DMS teve o valor de 1,31 para as misturas de brita 1 e de 2,44 para as de brita 0.

Essa análise é apresentada para a brita 1 na Tabela 23 para o traço 1:3,5; na Tabela 24 para o traço 1:5,0 e na Tabela 25 para 1:6,5.

Tabela 23: Teste de Tukey – Índice de Vazios – Brita 1 – Traço 1:3,5

Traço 1:3,5	Média 1	Média 2	Mód da Média	Dif. Sig.
Ref - 5a	27,35	24,46	2,90	S
Ref - 10a	27,35	20,49	6,86	S
5a - 10a	24,46	20,49	3,96	S

Fonte: Autor.

Tabela 24: Teste de Tukey – Índice de Vazios – Brita 1 – Traço 1:5,0

Traço 1:5,0	Média 1	Média 2	Mód da Média	Dif. Sig.
Ref - 5a	32,46	26,91	5,55	S
Ref - 10a	32,46	24,25	8,22	S
5a - 10a	26,91	24,25	2,66	S

Fonte: Autor.

Tabela 25: Teste de Tukey – Índice de Vazios – Brita 1 – Traço 1:6,5

Traço 1:6,5	Média 1	Média 2	Mód da Média	Dif. Sig.
Ref - 5a	38,08	30,96	7,12	S
Ref - 10a	38,08	26,38	11,70	S
5a - 10a	30,96	26,38	4,58	S

Fonte: Autor.

Como é possível verificar pelas tabelas, todas as comparações resultaram em diferença significativa no índice de vazios. Isso confirma o resultado obtido durante o ANOVA, no qual tanto as misturas quanto os traços causaram variação nos resultados.

Para a brita 0, essa análise é apresentada na Tabela 26 para o traço 1:3,5; na Tabela 27 para o traço 1:5,0 e na Tabela 28 para 1:6,5.

Tabela 26: Teste de Tukey – Índice de Vazios – Brita 0 – Traço 1:3,5

Traço 1:3,5	Média 1	Média 2	Mód da Média	Dif. Sig.
Ref - 5a	26,83	23,78	3,06	S
Ref - 10a	26,83	16,83	10,00	S
Ref - 5s	26,83	24,12	2,71	S
Ref - 10s	26,83	18,10	8,74	S
5a - 10a	23,78	16,83	6,95	S
5a - 5s	23,78	24,12	0,34	N
5a - 10s	23,78	18,10	5,68	S
10a - 5s	16,83	24,12	7,29	S
10a - 10s	16,83	18,10	1,27	N
5s - 10s	24,12	18,10	6,03	S

Fonte: Autor.

Tabela 27: Teste de Tukey – Índice de Vazios – Brita 0 – Traço 1:5,0

Traço 1:5,0	Média 1	Média 2	Mód da Média	Dif. Sig.
Ref - 5a	28,61	25,06	3,55	S
Ref - 10a	28,61	23,46	5,14	S
Ref - 5s	28,61	26,80	1,80	N
Ref - 10s	28,61	22,25	6,36	S
5a - 10a	25,06	23,46	1,59	N
5a - 5s	25,06	26,80	1,75	N
5a - 10s	25,06	22,25	2,81	S
10a - 5s	23,46	26,80	3,34	S
10a - 10s	23,46	22,25	1,21	N
5s - 10s	26,80	22,25	4,56	S

Fonte: Autor.

Tabela 28: Teste de Tukey – Índice de Vazios – Brita 0 – Traço 1:6,5

Traço 1:6,5	Média 1	Média 2	Mód da Média	Dif. Sig.
Ref - 5a	30,66	27,58	3,07	S
Ref - 10a	30,66	26,69	3,97	S
Ref - 5s	30,66	28,05	2,61	S
Ref - 10s	30,66	25,324735	5,33	S
5a - 10a	27,58	26,69	0,90	N
5a - 5s	27,58	28,05	0,46	N
5a - 10s	27,58	25,324735	2,26	N
10a - 5s	26,69	28,05	1,36	N
10a - 10s	26,69	25,324735	1,36	N
5s - 10s	28,05	25,324735	2,72	S

Fonte: Autor.

Pelo Teste de Tukey é possível verificar que apenas a adição de 5% de sílica no traço 1:5 não causou diferença significativa no índice de vazios das amostras em relação a mistura de referência, ou seja, sem adições. Em quase todas as misturas em que ocorreu a adição de materiais finos, houve também uma diminuição significativa no índice de vazios.

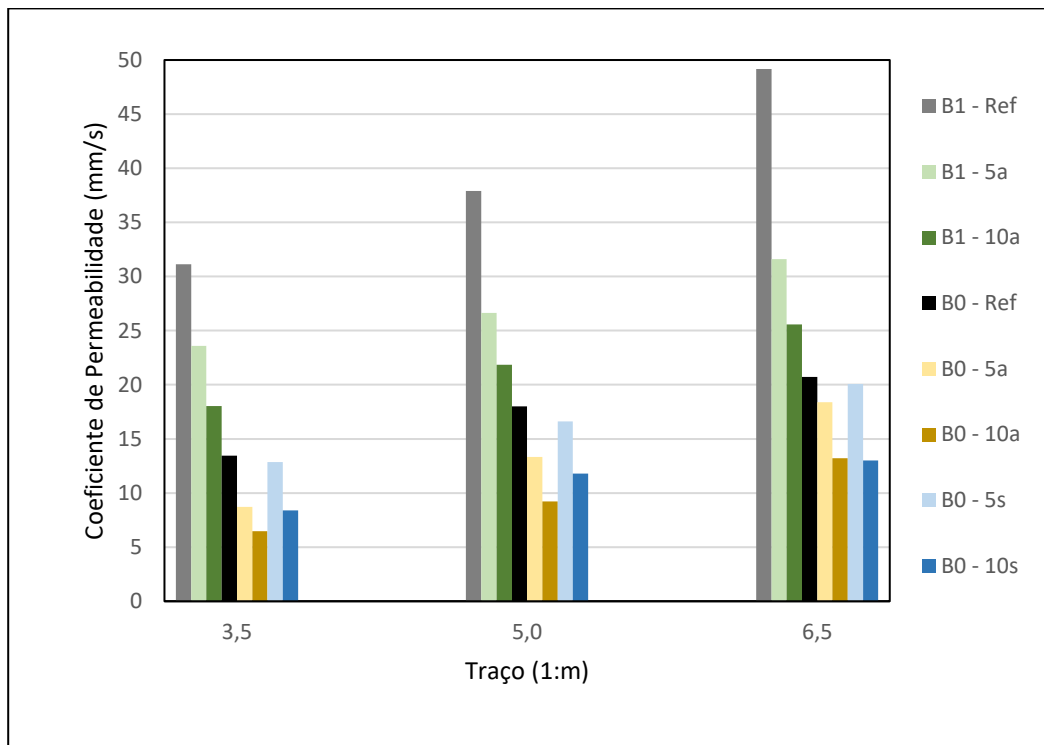
Pela Tabela 28 podemos notar que no traço de maior consumo de cimento a mesma porcentagem de areia e sílica não influenciou o índice de vazios. Já no traço 1:5, Tabela 29, as duas porcentagens iguais de areia e sílica não apresentaram

diferença e as duas porcentagens diferentes de areia também não. Neste traço o acréscimo de 5% de sílica ficou igual ao traço sem acréscimos.

O traço com menor consumo de cimento (Tabela 30), todos os traços sem adições apresentaram diferença, já os traços com adições o único que apresentou diferença foi o de sílica nas duas porcentagens diferentes.

O coeficiente de permeabilidade obtido em todos os traços elaborados está apresentado na Figura 20. A partir da análise da figura é possível notar que todos os traços que foram realizados com brita 1 obtiveram valores superiores de coeficiente de permeabilidade em relação aos traços de brita 0.

Figura 20: Coeficiente de Permeabilidade – Traços



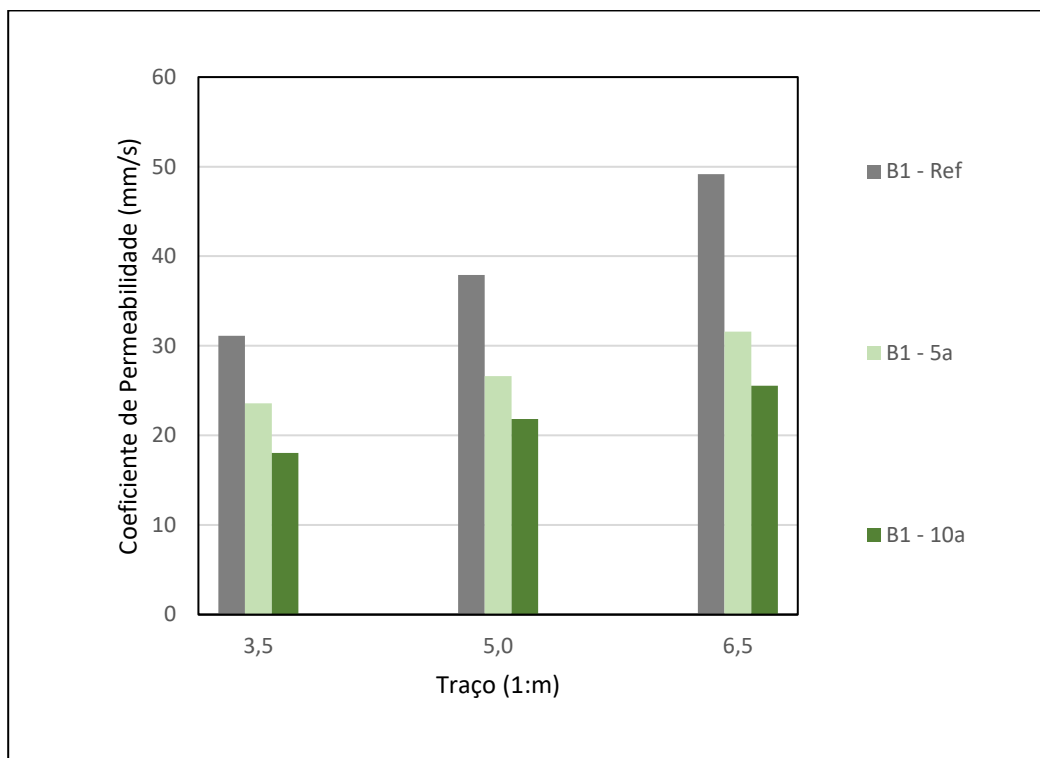
Fonte: Autor.

Da análise dos gráficos fica evidente que os traços que continham brita 1 obtiveram valores superiores de coeficiente de permeabilidade. Isso se deu devido ao fato de o agregado de maior granulometria resultar também em traços com maiores índices de vazios, e, possivelmente, maiores poros conectados, que permitem o escoamento de água.

A adição de materiais finos causou em todos os traços a redução da capacidade drenante. Ainda assim, todos os traços atenderam o mínimo exigido pela norma NBR 16416 (ABNT, 2015) em pelo menos cinco vezes.

Os primeiros avaliados foram os resultados referentes aos traços que continham brita 1 e as suas adições de areia, como representado na Figura 21.

Figura 21: Coeficiente de Permeabilidade – Traços Brita 1



Fonte: Autor.

É possível verificar que à medida que se diminuiu o consumo de cimento partindo de um traço rico para um traço pobre, o coeficiente de permeabilidade aumenta.

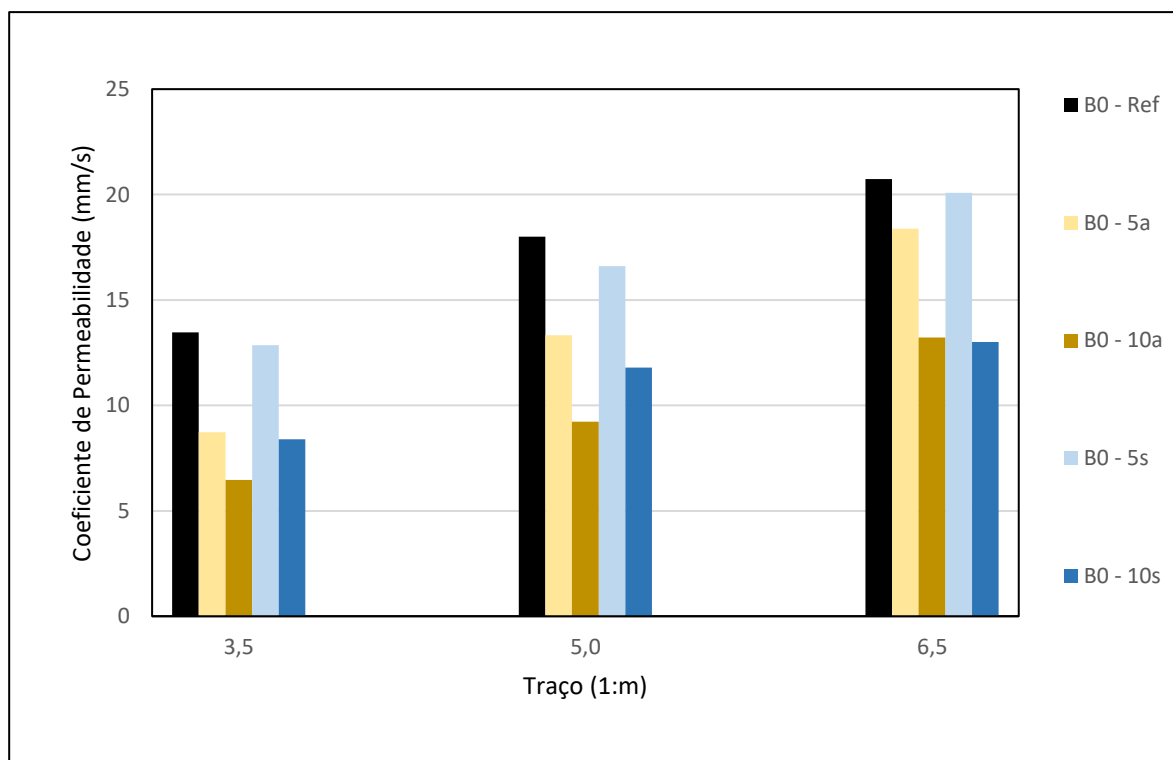
Em relação às misturas de referência, o traço 1:3,5 apresentou coeficiente de permeabilidade 17,87% menor em relação ao traço 1:5 e 36,71% menor relação ao 1:6,5. As misturas com 5% de areia do traço 1:3,5 teve o coeficiente de permeabilidade 11,45% menor em relação ao traço 1:5 e 25,38% menor relação ao 1:6,5. Já as misturas com 10% de areia o traço 1:3,5 foi 17,43% e 29,44% menor que os traços 1:5 e 1:6,5, respectivamente.

Ao analisar o traço de referência de 1:3,5 com o mesmo traço acrescido de 5 e 10% de areia pode-se observar que o coeficiente de permeabilidade diminuiu 24,26% e 42,07%, respectivamente. Quando foi acrescentado 5 e 10% de areia no traço 1:5, pode-se observar uma diminuição de 29,75 e 42,37%, respectivamente, em relação à mistura de referência de 1:5. Já o traço 1:6,5 apresentou 35,76 e 48,03% de diminuição no coeficiente de permeabilidade ao acrescentar 5 e 10% de areia, respectivamente.

Para as adições de areia aos traços, obteve-se menores valores do coeficiente de permeabilidade quanto maior a quantidade de agregados finos, uma vez que estes devem preencher os vazios presentes na composição do concreto.

Em seguida, foi realizada a avaliação do coeficiente de permeabilidade para os traços que continham brita 0 e as adições de areia e sílica, apresentados na Figura 22.

Figura 22: Coeficiente de Permeabilidade – Traços Brita 0



Fonte: Autor.

Em relação às misturas de referência, o traço 1:3,5 apresentou coeficiente de permeabilidade 25,24% menor em relação ao traço 1:5 e 35,07% menor relação ao 1:6,5. As misturas com 5% de areia do traço 1:3,5 teve o coeficiente de permeabilidade 35,52% menor em relação ao traço 1:5 e 52,54% menor relação ao 1:6,5. Já as misturas com 10% de areia o traço 1:3,5 foi 29,98% e 51,14% menor que os traços 1:5 e 1:6,5, respectivamente.

Para as misturas com 5% de sílica do traço 1:3,5 teve o coeficiente de permeabilidade 22,58% menor em relação ao traço 1:5 e 36,00% menor relação ao 1:6,5. Já as misturas com 10% de sílica o traço 1:3,5 foi 28,87% e 35,47% menor que os traços 1:5 e 1:6,5, respectivamente.

Ao analisar o traço de referência de 1:3,5 com o mesmo traço acrescido de 5 e 10% de areia pode-se observar que o coeficiente de permeabilidade diminuiu 35,17% e 51,99%, respectivamente. Quando foi acrescentado 5 e 10% de areia no traço 1:5, pode-se observar uma diminuição de 25,98 e 48,74%, respectivamente, em relação à mistura de referência de 1:5. Já o traço 1:6,5 apresentou 11,30 e 36,21% de diminuição no coeficiente de permeabilidade ao acrescentar 5 e 10% de areia, respectivamente.

Quando analisado o traço de referência de 1:3,5 com o mesmo traço acrescido de 5 e 10% de sílica pode-se observar que o coeficiente de permeabilidade diminuiu 4,50% e 37,67%, respectivamente. Quando foi acrescentado 5 e 10% de sílica no traço 1:5, pode-se observar uma diminuição de 7,78 e 34,49%, respectivamente, em relação à mistura de referência de 1:5. Já o traço 1:6,5 apresentou 3,11 e 37,28% de diminuição no coeficiente de permeabilidade ao acrescentar 5 e 10% de sílica, respectivamente.

Todos os traços com adições obtiveram diminuição em seu coeficiente de permeabilidade em relação ao traço de referência. Também foi possível verificar que à medida que o traço foi de um consumo de cimento rico para um pobre, o coeficiente de permeabilidade aumenta significativamente.

A análise estatística dos traços elaborados se deu por meio da análise do coeficiente de variância e da Análise de Variância dos resultados obtidos. Essa análise é apresentada na Tabela 29.

Tabela 29: Coeficiente de Permeabilidade – Estatística

Traço	km (mm/s)	DP (mm/s)	CV (%)
B1 - REF - 3,5	31,13	0,99	3,20
B1 - REF - 5,0	37,90	2,15	5,67
B1 - REF - 6,5	49,18	3,35	6,81
B1 - 5a - 3,5	23,58	0,63	2,68
B1 - 5a - 5,0	26,63	0,37	1,40
B1 - 5a - 6,5	31,59	0,11	0,35
B1 - 10a - 3,5	18,03	0,44	2,45
B1 - 10a - 5,0	21,84	0,29	1,33
B1 - 10a - 6,5	25,56	0,38	1,49
B0 - REF - 3,5	13,46	0,12	0,90
B0 - REF - 5,0	18,00	0,21	1,15
B0 - REF - 6,5	20,73	0,64	3,11
B0 - 5a - 3,5	8,73	0,25	2,88
B0 - 5a - 5,0	13,33	0,55	4,10
B0 - 5a - 6,5	18,39	0,78	4,24
B0 - 10a - 3,5	6,46	0,04	0,57
B0 - 10a - 5,0	9,23	0,70	7,59
B0 - 10a - 6,5	13,22	0,24	1,84
B0 - 5s - 3,5	12,85	0,76	5,95
B0 - 5s - 5,0	16,60	0,29	1,75
B0 - 5s - 6,5	20,09	0,34	1,67
B0 - 10s - 3,5	8,39	0,20	2,33
B0 - 10s - 5,0	11,79	0,01	0,07
B0 - 10s - 6,5	13,00	0,24	1,88

Fonte: Autor.

O maior valor de coeficiente de variação obtido foi de 6,81% para o traço B1 – Ref – 6,5. Isso indica que o método utilizado para elaboração dos traços foi eficiente à medida que não causou dispersão dos resultados.

Em uma análise geral, todos os traços apresentaram bons resultados quanto a suas capacidades drenantes. Ficou evidente que a diminuição da graduação da brita resultou na diminuição dessas características, como esperado.

Além disso houve aumento da capacidade drenante à medida que o consumo de cimento diminuía. Este comportamento foi verificado em todas as misturas. Vale ressaltar que, para fins de projeto, quanto a massa específica e coeficiente de permeabilidade mínimos, todos os traços atenderam com ampla margem.

Além disso, os resultados da Análise de Variância são apresentados nas Tabela 30 e Tabela 31.

Tabela 30: ANOVA – Coeficiente de Permeabilidade Traços B0

ANOVA	F	valor-P	F crítico
Adições	245,7701	1,4E-08	4,256495
Traço	96,14516	8,45E-07	4,256495
Conjunto	9,363011	0,002871	3,633089

Fonte: Autor.

Tabela 31: ANOVA – Coeficiente de Permeabilidade Traços B1

ANOVA	F	valor-P	F crítico
Adições	186,0555	1,38E-12	3,055568
Traço	348,1391	2,69E-13	3,68232
Conjunto	5,426734	0,002448	2,640797

Fonte: Autor.

Pela análise das tabelas é possível verificar que ambos os casos e para todos as características, “F” foi maior que “F crítico” e o “valor-P” foi inferior a 0,05. Isso indica que todos os valores são estatisticamente diferentes, ou seja, tanto as adições e o traço quanto o conjunto dos dois fatores influenciaram no coeficiente de permeabilidade.

Para a análise comparativa das misturas, realizou-se um teste de Tukey, onde foi possível comparar, em cada um dos traços, as misturas realizadas calculando-se a Diferença Mínima Significativa (DMS), fator pelo qual são comparadas as médias obtidas em cada uma das misturas. O DMS teve o valor de 3,93 para as misturas de brita 1 e de 1,86 para as de brita 0.

Essa análise é apresentada para a brita 1 na Tabela 32 para o traço 1:3,5; na Tabela 33 para o traço 1:5,0 e na Tabela 34 para 1:6,5.

Tabela 32: Teste de Tukey – Coef. de Permeabilidade – Brita 1 – Traço 1:3,5

Traço 1:3,5	Média 1	Média 2	Mód da Média	Dif. Sig.
Ref - 5a	31,13	23,58	7,55	S
Ref - 10a	31,13	18,03	13,09	S
5a - 10a	23,58	18,03	5,54	S

Fonte: Autor.

Tabela 33: Teste de Tukey – Coef. de Permeabilidade – Brita 1 – Traço 1:5,0

Traço 1:5,0	Média 1	Média 2	Mód da Média	Dif. Sig.
Ref - 5a	37,90	26,63	11,27	S
Ref - 10a	37,90	21,84	16,06	S
5a - 10a	26,63	21,84	4,78	S

Fonte: Autor.

Tabela 34: Teste de Tukey – Coef. de Permeabilidade – Brita 1 – Traço 1:6,5

Traço 1:6,5	Média 1	Média 2	Mód da Média	Dif. Sig.
Ref - 5a	49,18	31,59	17,58	S
Ref - 10a	49,18	25,56	23,62	S
5a - 10a	31,59	25,56	6,04	S

Fonte: Autor.

Como é possível verificar pelas tabelas, todas as comparações resultaram em diferença significativa no coeficiente de permeabilidade. Isso confirma o resultado obtido durante o ANOVA, no qual tanto as misturas quanto os traços causaram variação nos resultados.

Para a brita 0, essa análise é apresentada na Tabela 35 para o traço 1:3,5; na Tabela 36 para o traço 1:5,0 e na Tabela 37 para 1:6,5.

Tabela 35: Teste de Tukey – Coef. de Permeabilidade – Brita 0 – Traço 1:3,5

Traço 1:3,5	Média 1	Média 2	Mód da Média	Dif. Sig.
Ref - 5a	13,46	8,73	4,73	S
Ref - 10a	13,46	6,46	7,00	S
Ref - 5s	13,46	12,85	0,61	N
Ref - 10s	13,46	8,39	5,07	S
5a - 10a	8,73	6,46	2,26	S
5a - 5s	8,73	12,85	4,13	S
5a - 10s	8,73	8,39	0,34	N
10a - 5s	6,46	12,85	6,39	S
10a - 10s	6,46	8,39	1,93	S
5s - 10s	12,85	8,39	4,46	S

Fonte: Autor.

Tabela 36: Teste de Tukey – Coef. de Permeabilidade – Brita 0 – Traço 1:5,0

Traço 1:5,0	Média 1	Média 2	Mód da Média	Dif. Sig.
Ref - 5a	18,00	13,33	4,68	S
Ref - 10a	18,00	9,23	8,78	S
Ref - 5s	18,00	16,60	1,40	N
Ref - 10s	18,00	11,79	6,21	S
5a - 10a	13,33	9,23	4,10	S
5a - 5s	13,33	16,60	3,28	S
5a - 10s	13,33	11,79	1,53	N
10a - 5s	9,23	16,60	7,37	S
10a - 10s	9,23	11,79	2,57	S
5s - 10s	16,60	11,79	4,81	S

Fonte: Autor.

Tabela 37: Teste de Tukey – Coef. de Permeabilidade – Brita 0 – Traço 1:6,5

Traço 1:6,5	Média 1	Média 2	Mód da Média	Dif. Sig.
Ref - 5a	20,73	18,39	2,34	S
Ref - 10a	20,73	13,22	7,51	S
Ref - 5s	20,73	20,09	0,64	N
Ref - 10s	20,73	13,001162	7,73	S
5a - 10a	18,39	13,22	5,16	S
5a - 5s	18,39	20,09	1,70	N
5a - 10s	18,39	13,001162	5,39	S
10a - 5s	13,22	20,09	6,86	S
10a - 10s	13,22	13,001162	0,22	N
5s - 10s	20,09	13,001162	7,08	S

Fonte: Autor.

Pelo Teste de Tukey é possível verificar que apenas a adição de 5% de sílica em todos os traços não causou diferença significativa no coeficiente de permeabilidade das amostras quando comparada com a mistura de referência. Ou seja, na maioria das misturas em que ocorreu a adição de materiais finos, houve também uma diminuição significativa no coeficiente de permeabilidade.

Além disso, é possível verificar que as adições tiveram comportamentos semelhantes quando comparadas entre si. Por outro lado, quando comparadas aos traços de referência, apenas a adição de 5% de sílica foi capaz de não causar diferença significativa.

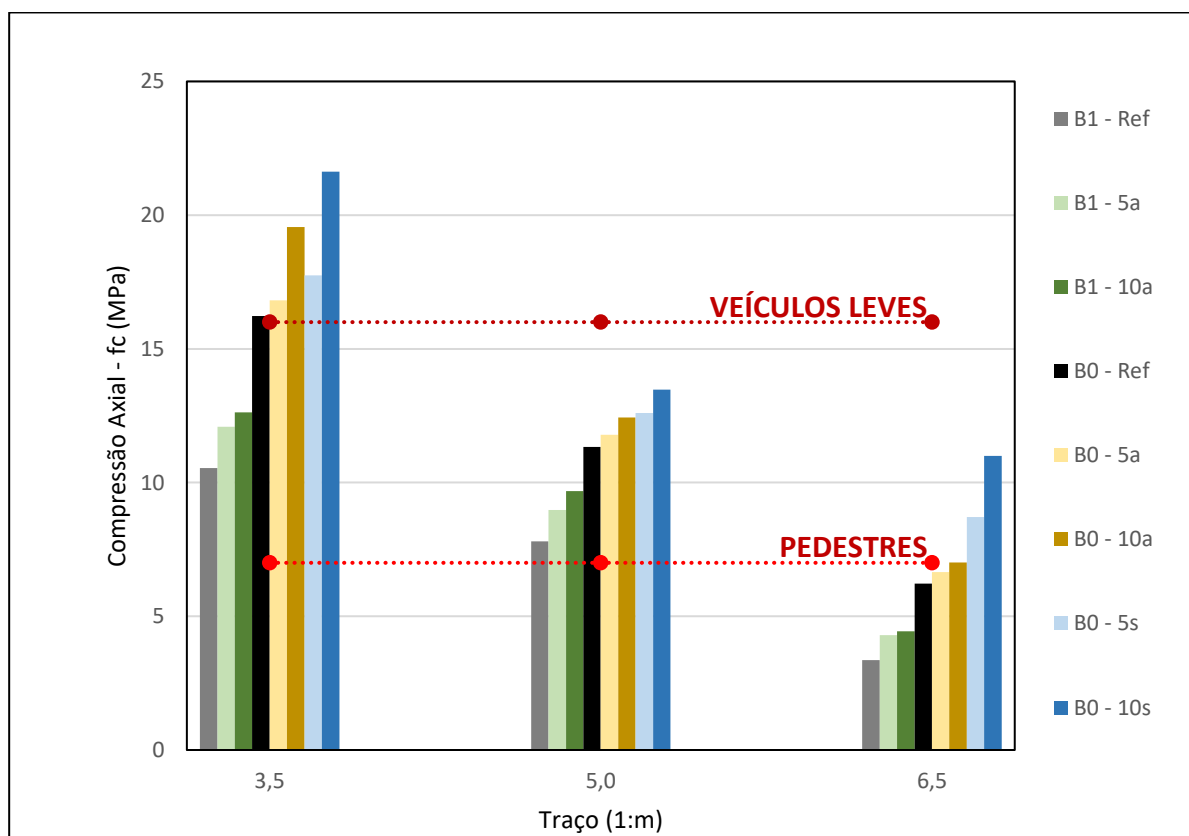
b. ANÁLISE RESULTADOS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA

A análise dos resultados de resistência mecânica foi realizada levando-se em consideração as finalidades dos possíveis usos estipulados por norma no Brasil. Dessa forma, todas as comparações analisaram se os traços podem ser utilizados para o tráfego de veículos leves e/ou para tráfego de pedestres.

Para tanto, utilizando as resistências a tração na flexão exigidas pela NBR 16416 (ABNT, 2015) que são de 2MPa para veículos leves e 1MPa para pedestres na equação de Gaedicke *et al.* (2016), foi possível estimar um valor de resistência a compressão axial mínimo de 16MPa para veículos leves e de 7MPa para pedestres.

A resistência a compressão axial obtida em todos os traços elaborados está apresentada na Figura 23 assim como os limites estimados. A partir da análise da figura é possível notar que todos os traços que foram realizados com brita 0 obtiveram valores superiores em relação aos traços de brita 1, quando comparados os traços rico, médio e pobre, entre si.

Figura 23: Resistência a Compressão Axial – Traços



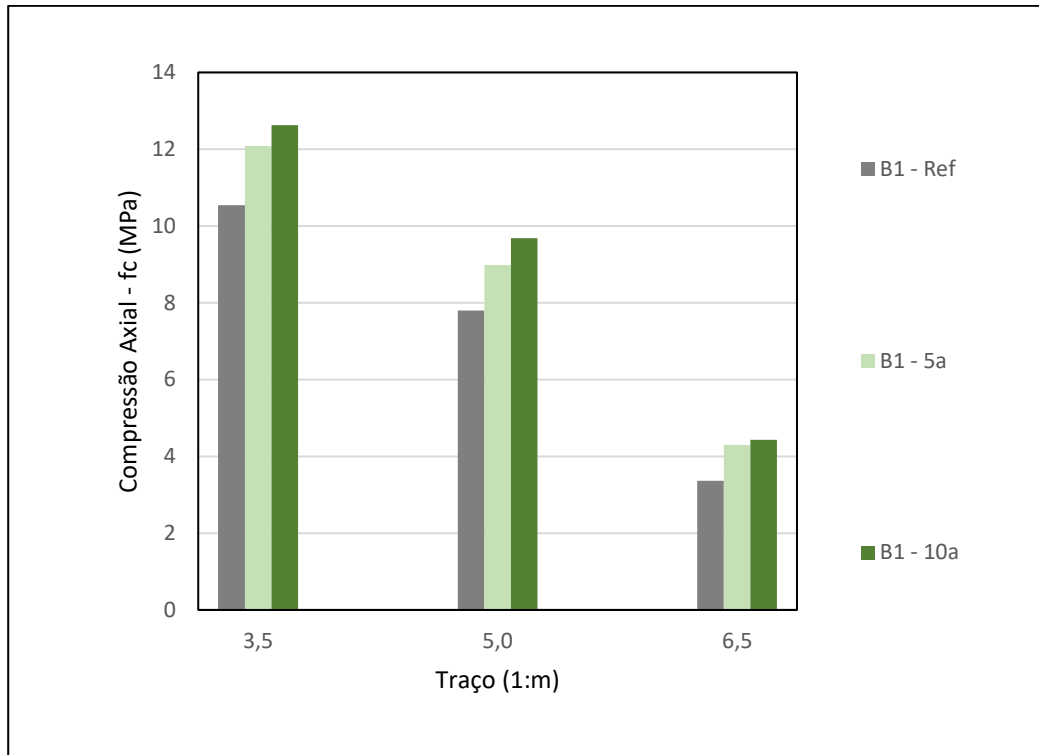
Fonte: Autor.

É possível verificar que os traços ricos e médios atenderam ao uso de pedestres no mínimo e que para os traços pobres, os únicos capazes de atenderem os requisitos mínimos de uso foram os que continham sílica em sua composição.

Além disso, é possível verificar que existe relação entre as adições de materiais finos e a resistência dos traços à medida que todos os traços ganharam resistência em relação aos traços de referência.

Para uma análise mais detalhada dos traços elaborados com brita 1, apresenta-se os resultados obtidos na Figura 24.

Figura 24: Compressão Axial – Brita 1



Fonte: Autor.

Em relação às misturas de referência, o traço 1:3,5 apresentou resistência à compressão axial 36,16% maior em relação ao traço 1:5 e 213,76% maior relação ao 1:6,5. As misturas com 5% de areia do traço 1:3,5 teve a resistência à compressão axial 34,55% maior em relação ao traço 1:5 e 181,32% maior relação ao 1:6,5. Já as misturas com 10% de areia o traço 1:3,5 foi 30,38% e 184,72% maior que os traços 1:5 e 1:6,5, respectivamente.

Ao analisar o traço de referência de 1:3,5 com o mesmo traço acrescido de 5 e 10% de areia pode-se observar que a resistência à compressão axial aumentou 14,61% e 19,78%, respectivamente. Quando foi acrescentado 5 e 10% de areia no traço 1:5, pode-se observar um aumento de 15,13 e 24,17%, respectivamente, em relação à mistura de referência de 1:5. Já o traço 1:6,5 apresentou 27,83 e 31,99%

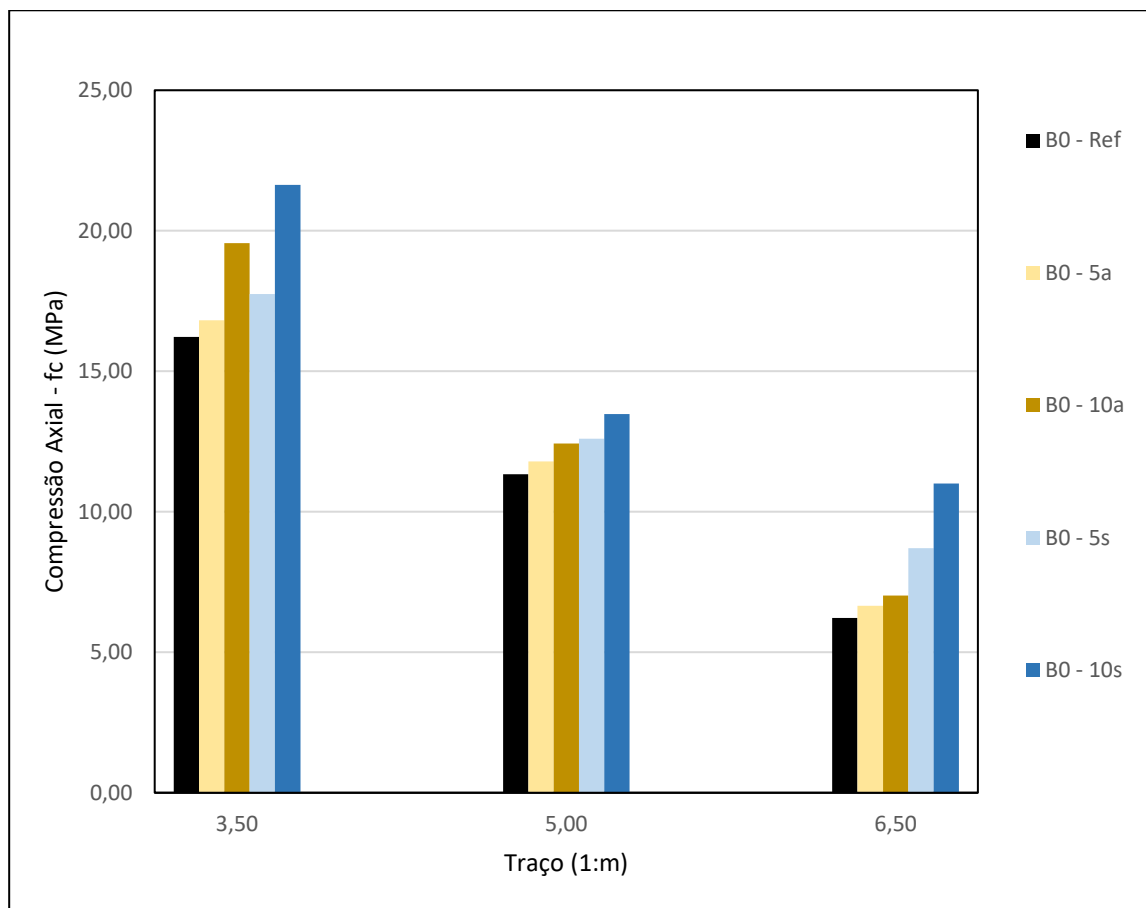
de ganho na resistência à compressão axial ao acrescentar 5 e 10% de areia, respectivamente.

É possível verificar que à medida que se diminui o consumo de cimento, partindo de um traço rico para um traço pobre, a resistência a compressão axial diminui.

Para as adições de areia aos traços, obteve-se maiores valores de resistência a compressão axial quanto maior a quantidade de agregados finos.

Em seguida, foi realizada a mesma avaliação para os traços que continham brita 0 e as adições de areia e sílica, apresentados na Figura 25.

Figura 25: Compressão Axial – Traços Brita 0



Fonte: Autor.

Todos os traços com adições obtiveram ganhos em sua resistência em relação ao traço de referência. O ganho de resistência para as adições de sílica foi superior nas duas porcentagens de adições.

Em relação às misturas de referência, o traço 1:3,5 apresentou resistência à compressão axial 43,20% maior em relação ao traço 1:5 e 160,75% maior relação ao 1:6,5. As misturas com 5% de areia do traço 1:3,5 teve a resistência à compressão axial 42,63% maior em relação ao traço 1:5 e 152,72% maior relação ao 1:6,5. Já as misturas com 10% de areia o traço 1:3,5 foi 57,29% e 178,76% maior que os traços 1:5 e 1:6,5, respectivamente.

Para as misturas com 5% de sílica do traço 1:3,5 teve a resistência à compressão axial 40,90% maior em relação ao traço 1:5 e 103,85% maior relação ao 1:6,5. Já as misturas com 10% de sílica o traço 1:3,5 foi 60,52% e 96,59% maior que os traços 1:5 e 1:6,5, respectivamente.

Ao analisar o traço de referência de 1:3,5 com o mesmo traço acrescido de 5 e 10% de areia pode-se observar que a resistência à compressão axial aumentou 3,62% e 20,52%, respectivamente. Quando foi acrescentado 5 e 10% de areia no traço 1:5, pode-se observar um aumento de 4,04 e 9,73%, respectivamente, em relação à mistura de referência de 1:5. Já o traço 1:6,5 apresentou 6,91 e 12,74% de aumento na resistência à compressão axial ao acrescentar 5 e 10% de areia, respectivamente.

Quando analisado o traço de referência de 1:3,5 com o mesmo traço acrescido de 5 e 10% de sílica pode-se observar que a resistência à compressão axial aumentou 9,40% e 33,31%, respectivamente. Quando foi acrescentado 5 e 10% de sílica no traço 1:5, pode-se observar um aumento de 11,19 e 18,93%, respectivamente, em relação à mistura de referência de 1:5. Já o traço 1:6,5 apresentou 39,94 e 76,82% de aumento na resistência à compressão axial ao acrescentar 5 e 10% de sílica, respectivamente.

Para todos os traços foram utilizadas linhas de tendência em formato linear, essa regressão foi a que obteve melhor coeficiente de R^2 , sendo, portanto, a que melhor representa o comportamento da resistência a compressão axial dos traços em função do valor de m.

A análise estatística dos traços elaborados se deu por meio da análise do coeficiente de variância e da Análise de Variância dos resultados obtidos. Essa análise é apresentada na Tabela 38.

Tabela 38: Compressão Axial - Estatística

Traço	fcm (MPa)	DP (MPa)	CV (%)
B1 - REF - 3,5	10,54	1,38	13,10
B1 - REF - 5,0	7,80	1,19	15,20
B1 - REF - 6,5	3,36	0,82	24,52
B1 - 5a - 3,5	12,08	1,33	11,02
B1 - 5a - 5,0	8,98	0,89	9,86
B1 - 5a - 6,5	4,30	0,43	10,11
B1 - 10a - 3,5	12,63	0,58	4,61
B1 - 10a - 5,0	9,69	0,81	8,33
B1 - 10a - 6,5	4,44	0,61	13,76
B0 - Ref - 3,5	16,23	0,33	2,03
B0 - Ref - 5,0	11,33	0,94	8,31
B0 - Ref - 6,5	6,22	0,38	6,17
B0 - 5a - 3,5	16,81	1,00	5,94
B0 - 5a - 5,0	11,79	0,76	6,42
B0 - 5a - 6,5	6,65	0,28	4,22
B0 - 10a - 3,5	19,56	1,00	5,09
B0 - 10a - 5,0	12,43	1,16	9,36
B0 - 10a - 6,5	7,02	0,71	10,10
B0 - 5s - 3,5	17,75	0,94	5,31
B0 - 5s - 5,0	12,60	0,62	4,90
B0 - 5s - 6,5	8,71	0,65	7,42
B0 - 10s - 3,5	21,63	0,92	4,25
B0 - 10s - 5,0	13,48	0,68	5,04
B0 - 10s - 6,5	11,00	0,48	4,40

Fonte: Autor.

O maior valor de coeficiente de variação obtido foi de 24,52% para o traço B1 – Ref – 6,5. Esse valor é superior ao esperado que eram valores na faixa de 10%. Entretanto, para os traços que continham brita 1, eram esperados valores mais dispersos, isso porque, com a maior granulometria vem também uma dificuldade maior na homogeneização do concreto.

Apesar dessa dispersão, no geral, os outros traços tiveram um coeficiente de variação baixo, isso indica que o método utilizado para elaboração dos traços foi eficiente à medida que não causou dispersão dos resultados.

Além disso, os resultados da Análise de Variância são apresentados nas Tabela 39 e Tabela 40.

Tabela 39: ANOVA – Resistência à Compressão Axial Traços B0

ANOVA	F	valor-P	F crítico
Adições	10,0638	0,000542	3,354131
Traço	202,6342	5,5E-17	3,354131
Conjunto	0,343425	0,846204	2,727765

Fonte: Autor.

Tabela 40: ANOVA – Resistência à Compressão Axial Traços B0

ANOVA	F	valor-P	F crítico
Adições	38,90154	4,58E-14	2,578739
Traço	708,011	9,83E-35	3,204317
Conjunto	4,582456	0,000391	2,152133

Fonte: Autor.

Pela análise das tabelas é possível verificar que ambos os casos e para todos as características, “F” foi maior que “F crítico” e o “valor-P” foi inferior a 0,05. Isso indica que todos os valores são estatisticamente diferentes, ou seja, tanto as adições e o traço quanto o conjunto dos dois fatores influenciaram na resistência a compressão axial.

Para a análise comparativa das misturas, realizou-se um teste de Tukey, onde foi possível comparar, em cada um dos traços, as misturas realizadas calculando-se a Diferença Mínima Significativa (DMS), fator pelo qual são comparadas as médias obtidas em cada uma das misturas. O DMS teve o valor de 1,66 para as misturas de brita 1 e de 1,79 para as de brita 0.

Essa análise é apresentada para a brita 1 na Tabela 41 para o traço 1:3,5; na Tabela 42 para o traço 1:5,0 e na Tabela 43 para 1:6,5.

Tabela 41: Teste de Tukey – Res. Comp. Axial – Brita 1 – Traço 1:3,5

Traço 1:3,5	Média 1	Média 2	Mód da Média	Dif. Sig.
Ref - 5a	10,54	12,08	1,54	N
Ref - 10a	10,54	12,63	2,09	S
5a - 10a	12,08	12,63	0,55	N

Fonte: Autor.

Tabela 42: Teste de Tukey – Res. Comp. Axial – Brita 1 – Traço 1:5,0

Traço 1:5,0	Média 1	Média 2	Mód da Média	Dif. Sig.
Ref - 5a	7,80	8,98	1,18	N
Ref - 10a	7,80	9,69	1,89	S
5a - 10a	8,98	9,69	0,71	N

Fonte: Autor.

Tabela 43: Teste de Tukey – Res. Comp. Axial – Brita 1 – Traço 1:6,5

Traço 1:6,5	Média 1	Média 2	Mód da Média	Dif. Sig.
Ref - 5a	3,36	4,30	0,94	N
Ref - 10a	3,36	4,44	1,08	N
5a - 10a	4,30	4,44	0,14	N

Fonte: Autor.

Como é possível verificar pelas tabelas, a maioria das comparações não resultaram em diferença significativa na resistência a compressão axial. As únicas misturas que apresentaram diferenças significativas foram as que continham 10% de adição de areia, nos traços 1:3,5 e 1:5,0.

Para a brita 0, essa análise é apresentada na Tabela 44 para o traço 1:3,5; na Tabela 45 para o traço 1:5,0 e na Tabela 46 para 1:6,5.

Tabela 44: Teste de Tukey – Res. Comp. Axial – Brita 0 – Traço 1:3,5

Traço 1:3,5	Média 1	Média 2	Mód da Média	Dif. Sig.
Ref - 5a	16,23	16,81	0,59	N
Ref - 10a	16,23	19,56	3,33	S
Ref - 5s	16,23	17,75	1,53	N
Ref - 10s	16,23	21,63	5,41	S
5a - 10a	16,81	19,56	2,74	S
5a - 5s	16,81	17,75	0,94	N
5a - 10s	16,81	21,63	4,82	S
10a - 5s	19,56	17,75	1,81	S
10a - 10s	19,56	21,63	2,08	S
5s - 10s	17,75	21,63	3,88	S

Fonte: Autor.

Tabela 45: Teste de Tukey – Res. Comp. Axial – Brita 0 – Traço 1:5,0

Traço 1:5,0	Média 1	Média 2	Mód da Média	Dif. Sig.
Ref - 5a	11,33	11,79	0,46	N
Ref - 10a	11,33	12,43	1,10	N
Ref - 5s	11,33	12,60	1,27	N
Ref - 10s	11,33	13,48	2,15	S
5a - 10a	11,79	12,43	0,64	N
5a - 5s	11,79	12,60	0,81	N
5a - 10s	11,79	13,48	1,69	N
10a - 5s	12,43	12,60	0,17	N
10a - 10s	12,43	13,48	1,04	N
5s - 10s	12,60	13,48	0,88	N

Fonte: Autor.

Tabela 46: Teste de Tukey – Res. Comp. Axial – Brita 0 – Traço 1:6,5

Traço 1:6,5	Média 1	Média 2	Mód da Média	Dif. Sig.
Ref - 5a	6,22	6,65	0,43	N
Ref - 10a	6,22	7,02	0,79	N
Ref - 5s	6,22	8,71	2,49	S
Ref - 10s	6,22	11,0025	4,78	S
5a - 10a	6,65	7,02	0,36	N
5a - 5s	6,65	8,71	2,06	S
5a - 10s	6,65	11,0025	4,35	S
10a - 5s	7,02	8,71	1,69	N
10a - 10s	7,02	11,0025	3,99	S
5s - 10s	8,71	11,0025	2,30	S

Fonte: Autor.

Pelo Teste de Tukey é possível verificar que no geral a mistura com 10% de adição de sílica apresentou resultados com diferença significativa quando comparada com os demais.

Além disso, é possível verificar que nos traços com menor consumo de cimento, as adições de sílica, quando comparadas com as misturas de referência, foram as únicas capazes de gerar diferenças significativas de resistência.

Em uma análise geral, todos os traços apresentaram bons resultados quanto a sua resistência. Ficou evidente que a diminuição da graduação da brita resultou na melhora dessa característica.

Além disso, a diminuição da resistência à medida que era realizada o enfraquecimento dos traços também foi um comportamento verificado em todas as misturas. Vale ressaltar que, para fins de projeto, apenas os traços de sílica atenderam, nas três medidas de “m”, pelo menos uma função de uso.

Como esperado pela grande quantidade de vazios presentes nos traços de brita 1, a resistência a compressão axial obtida não foi satisfatória. Esse fato foi comprovado pela estimativa da resistência a compressão diametral e de tração na flexão proposto antes da produção efetiva desses traços, para evitar o desperdício de material.

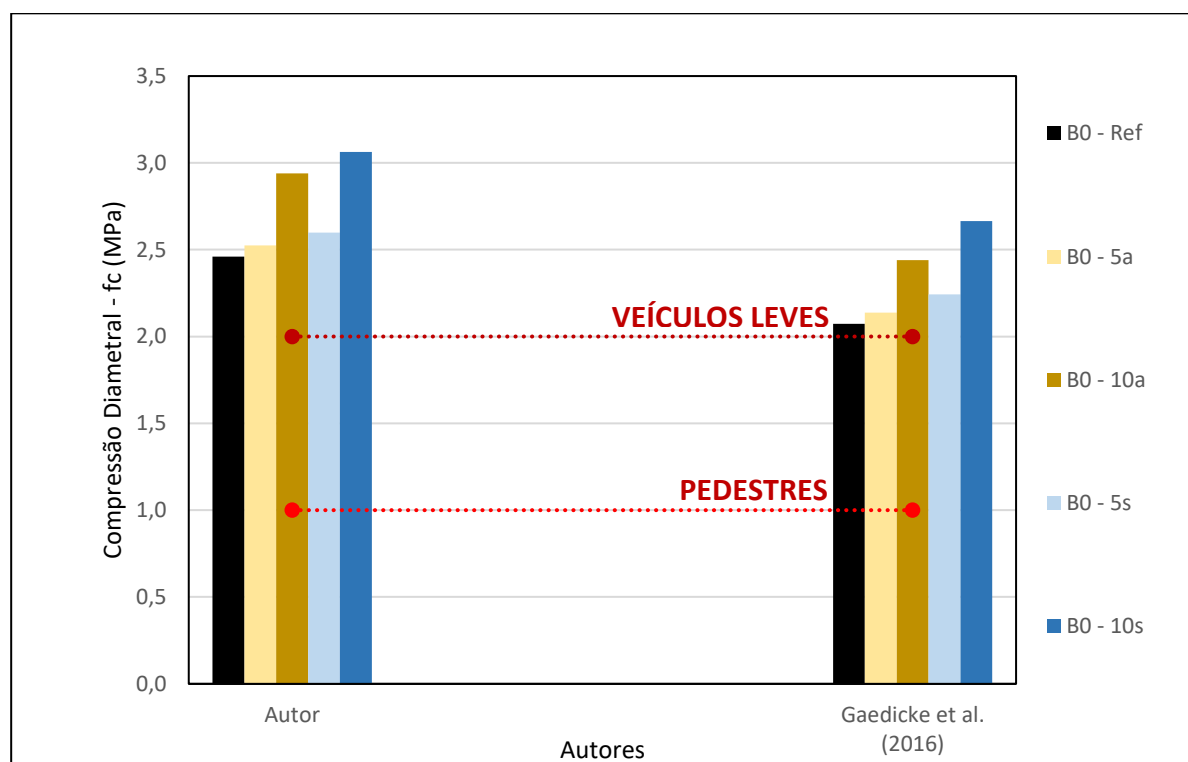
Verificando que não havia a necessidade de se avaliar de forma mais criteriosa os traços com brita 1, apenas os traços que continham brita 0 foram ensaiados também a compressão diametral.

Os resultados obtidos nos ensaios de compressão diametral desses traços foram comparados com os resultados obtidos por estimativa, a partir dos valores de resistência a compressão axial, por meio da equação de Gaedicke *et al.* (2016) para verificar se a aproximação realizada para os resultados de tração indireta foi adequada.

Como citado no capítulo anterior, os valores dos resultados dos ensaios de compressão diametral são inferiores aos valores dos resultados do ensaio de tração na flexão de um mesmo traço, ou seja, isso faz com que a utilização do mínimo de resistência a tração na flexão imposto pela norma NBR 16416 (ABNT, 2015) seja uma aproximação a favor da segurança. Os limites são de 2MPa para o uso do pavimento para veículos leves e de 1MPa para pedestres.

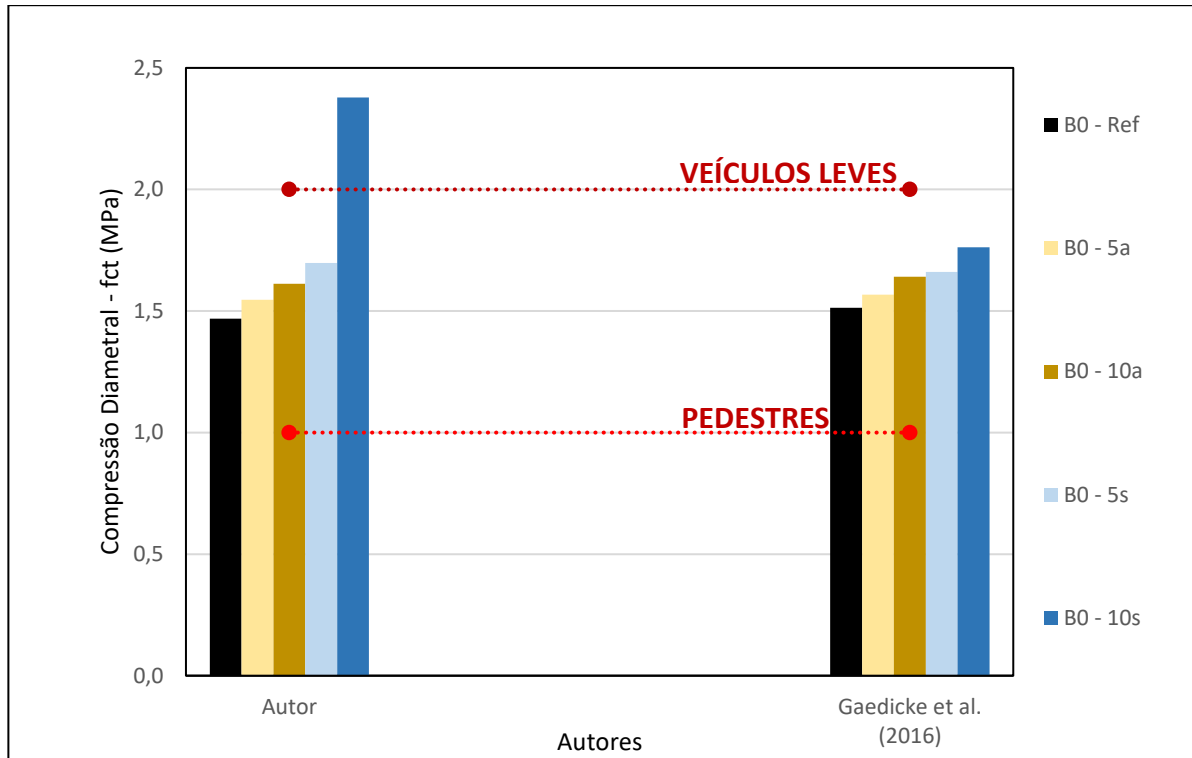
Os resultados obtidos por equação, e os obtidos de forma experimental, são demonstrados nas Figura 26, Figura 27 e Figura 28, para o traço rico, médio e pobre, respectivamente.

Figura 26: Traço Rico – Autor x Equação de Gaedicke et al. (2016)



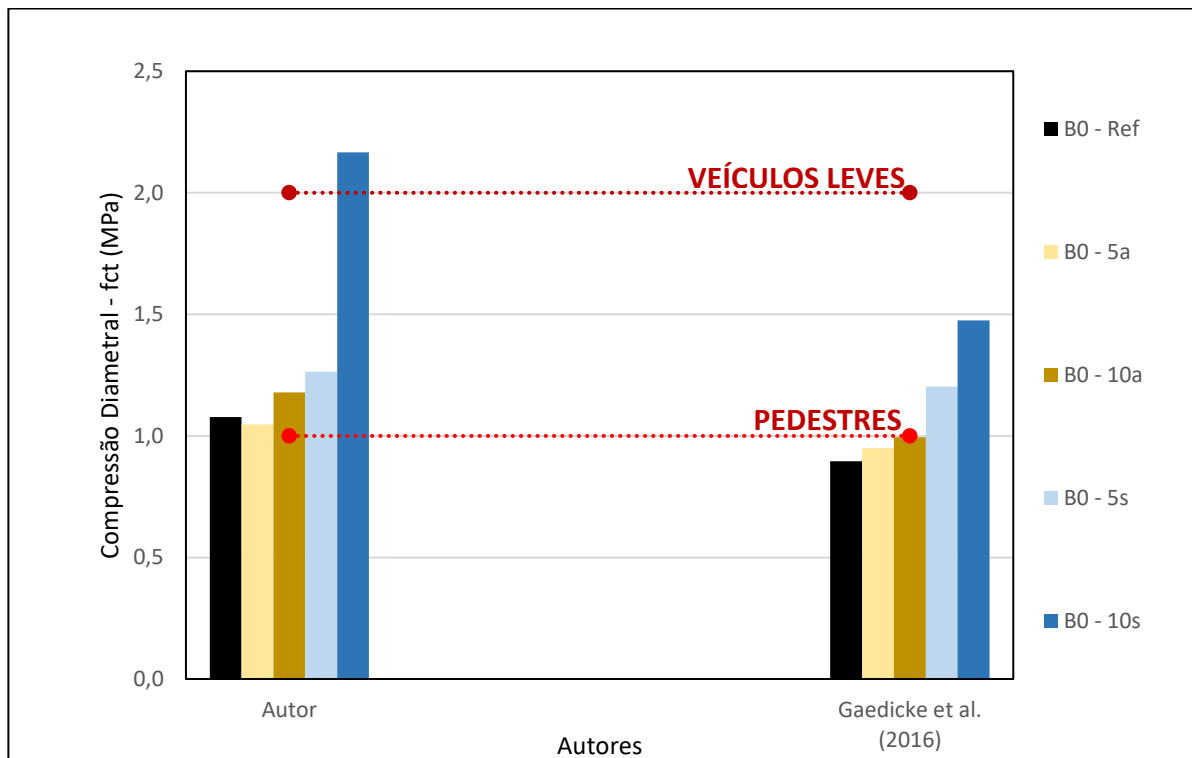
Fonte: Autor.

Figura 27: Traço Médio – Autor x Equação de Gaedicke et al. (2016)



Fonte: Autor.

Figura 28: Traço Pobre – Autor x Equação de Gaedicke et al. (2016)

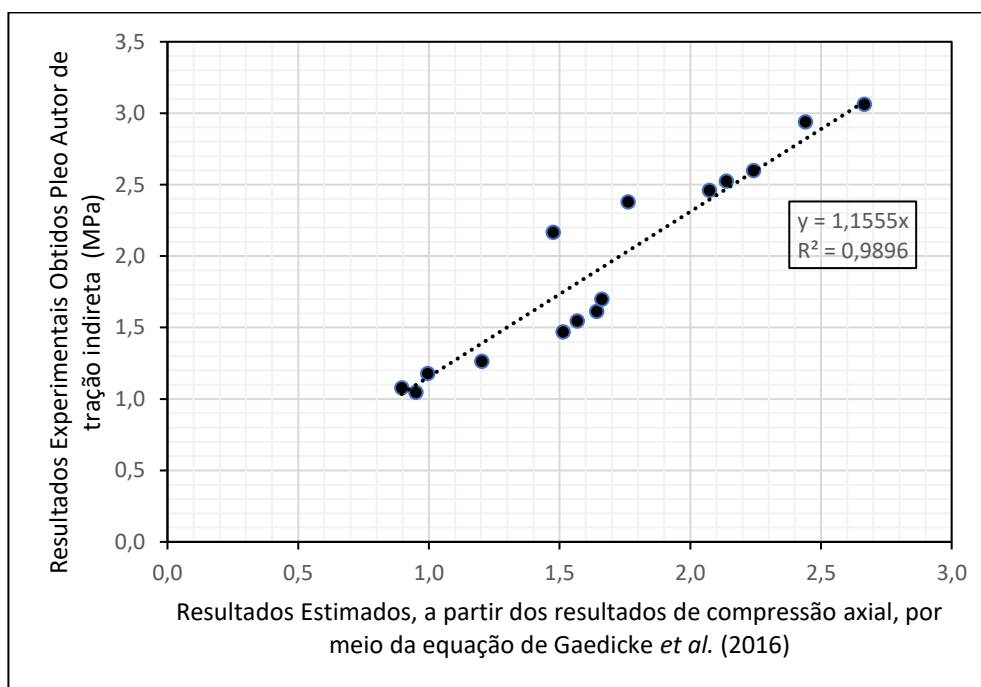


Fonte: Autor.

É possível verificar que os resultados se dispersam à medida que o consumo de cimento diminui. No geral, os resultados obtidos em laboratório foram superiores aos obtidos por meio da equação proposta por Gaedicke *et al.* (2016).

Para uma melhor avaliação da comparação produziu-se o gráfico da Figura 29.

Figura 29: Comparação Tração Indireta – Autor x Gaedicke *et al.* (2016)



Fonte: Autor.

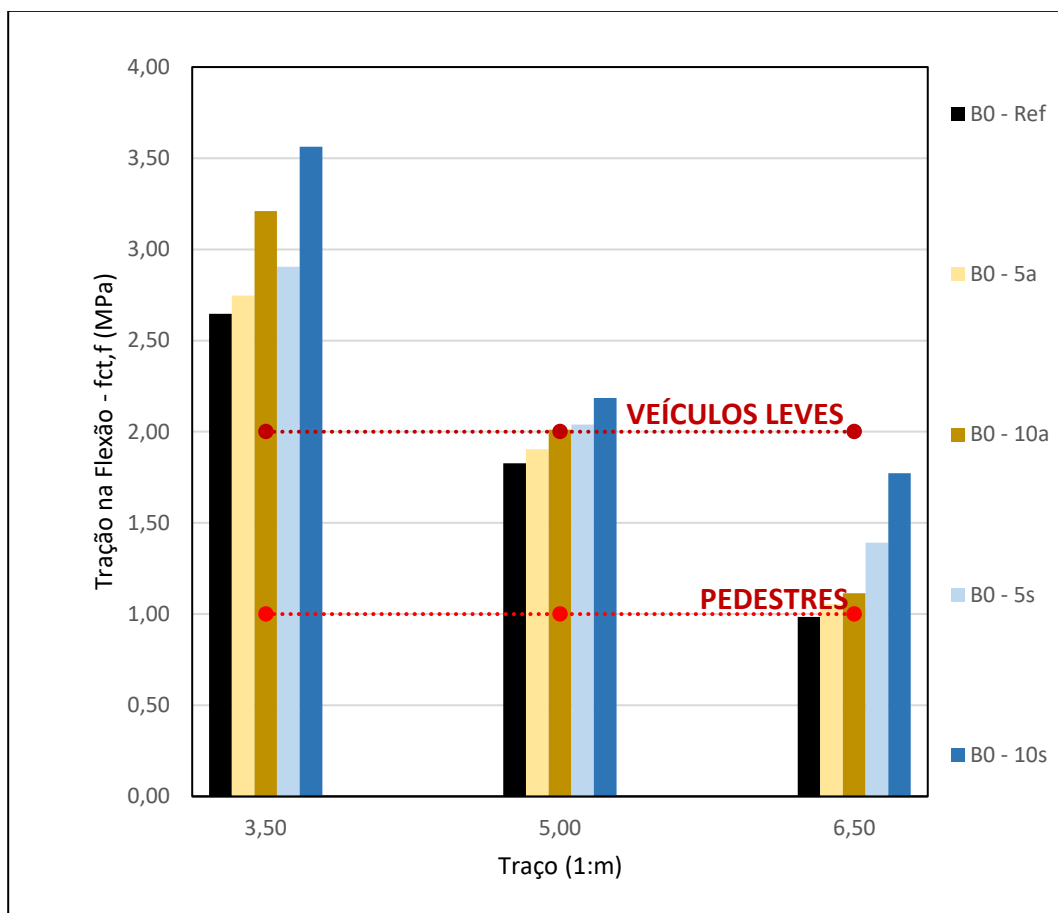
É possível verificar que os resultados obtidos pelo autor são, em média, 16% maiores que os estimados. Dessa forma, a comparação é válida, uma vez que nos permitiu avaliar os traços compostos por brita 1 e nos garante que, com certeza, aqueles que atendem ao mínimo estimado, o atendem com uma margem de segurança.

Nota-se também que os acréscimos de resistência produzida pela adição de sílica foram substancialmente superiores ao estimado fazendo com que, na prática, todos os traços com 10% de adição atendessem o mínimo necessário para solicitação imposta por veículos leves.

Para uma análise mais detalhada, utilizou-se a equação proposta por Chhorn *et al.* (2018), que é para concretos permeáveis, para analisar quais seriam os resultados dos traços produzidos quando ensaiados a tração por flexão.

Os resultados obtidos são apresentados no gráfico da Figura 30 que apresenta, além dos resultados estimados, os mínimos de resistência exigidos pela NBR 16416 (ABNT, 2015) de 2MPa para o uso em veículos leves e de 1MPa para o uso de pedestres.

Figura 30: Tração na Flexão – Obtenção pela Equação de Chhorn *et al.* (2018)



Fonte: Autor.

A análise do gráfico mostra que é possível atingir valores para a aplicação em pavimentos de veículos leves no traço médio também para a areia e em ambos os traços de sílica.

A análise estatística dos traços elaborados se deu por meio da análise do coeficiente de variância e da Análise de Variância dos resultados obtidos. Essa análise é apresentada na Tabela 47.

Tabela 47: Compressão Diametral – Estatística

Traço	Fct,spm (Mpa)	DP (MPa)	CV (%)
B0 - Ref - 3,5	2,46	0,29	11,84
B0 - Ref - 5,0	1,63	0,05	3,31
B0 - Ref - 6,5	1,35	0,20	15,12
B0 - 5a - 3,5	0,96	0,17	17,71
B0 - 5a - 5,0	0,92	0,14	14,97
B0 - 5a - 6,5	0,95	0,05	5,47
B0 - 10a - 3,5	2,94	0,20	6,87
B0 - 10a - 5,0	1,18	0,12	9,90
B0 - 10a - 6,5	1,02	0,07	6,49
B0 - 5s - 3,5	2,29	0,17	7,58
B0 - 5s - 5,0	1,51	0,11	7,30
B0 - 5s - 6,5	1,11	0,10	8,76
B0 - 10s - 3,5	3,06	0,20	6,59
B0 - 10s - 5,0	2,38	0,06	2,37
B0 - 10s - 6,5	2,17	0,01	0,52

Fonte: Autor.

O maior coeficiente de variação foi de 17,71%, que é um valor alto para concreto. Apesar disso, no geral, a maioria dos traços obteve valores abaixo de 10%, o que indica uniformidade na amostra.

É importante evidenciar o traço que continha 10% de sílica em adição foi capaz de produzir um concreto, numa proporção pobre (1:6,5), que atendeu com margem a solicitação imposta pela norma brasileira.

Além disso, a tabela indica que os traços que continham sílica também foram os que tiveram menores coeficientes de variação, quando comparados aos de areia e ao de referência. Isso sugere que a presença da sílica melhorou a homogeneidade da mistura.

Além disso, os resultados da Análise de Variância são apresentados nas Tabela 48.

Tabela 48: ANOVA – Resistência à Compressão Diametral Traços B0

ANOVA	F	valor-P	F crítico
Adições	69,12684	1,24E-18	2,578739
Traço	466,8246	8,09E-31	3,204317
Conjunto	5,090712	0,000153	2,152133

Fonte: Autor.

Pela análise das tabelas é possível verificar que para todas as características “F” foi maior que “F crítico” e o “valor-P” foi inferior a 0,05. Isso indica que todos os valores são estatisticamente diferentes, ou seja, tanto as adições e o traço quanto o conjunto dos dois fatores influenciaram na resistência a tração por compressão diametral.

Para a análise comparativa das misturas, realizou-se um teste de Tukey, onde foi possível comparar, em cada um dos traços, as misturas realizadas calculando-se a Diferença Mínima Significativa (DMS), fator pelo qual são comparadas as médias obtidas em cada uma das misturas. O DMS teve o valor de 0,3 para as misturas de brita 0.

Essa análise é apresentada para a brita 0 na Tabela 49 para o traço 1:3,5; na Tabela 50 para o traço 1:5,0 e na Tabela 51 para 1:6,5.

Tabela 49: Teste de Tukey – Res. Comp. Diam. – Brita 0 – Traço 1:3,5

Traço 1:3,5	Média 1	Média 2	Mód da Média	Dif. Sig.
Ref - 5a	2,46	2,52	0,06	N
Ref - 10a	2,46	2,94	0,48	S
Ref - 5s	2,46	2,60	0,14	N
Ref - 10s	2,46	3,06	0,60	S
5a - 10a	2,52	2,94	0,41	S
5a - 5s	2,52	2,60	0,07	N
5a - 10s	2,52	3,06	0,54	S
10a - 5s	2,94	2,60	0,34	S
10a - 10s	2,94	3,06	0,12	N
5s - 10s	2,60	3,06	0,46	S

Fonte: Autor.

Tabela 50: Teste de Tukey – Res. Comp. Diam. – Brita 0 – Traço 1:5,0

Traço 1:5,0	Média 1	Média 2	Mód da Média	Dif. Sig.
Ref - 5a	1,47	1,55	0,08	N
Ref - 10a	1,47	1,61	0,14	N
Ref - 5s	1,47	1,70	0,23	N
Ref - 10s	1,47	2,38	0,91	S
5a - 10a	1,55	1,61	0,07	N
5a - 5s	1,55	1,70	0,15	N
5a - 10s	1,55	2,38	0,83	S
10a - 5s	1,61	1,70	0,09	N
10a - 10s	1,61	2,38	0,77	S
5s - 10s	1,70	2,38	0,68	S

Fonte: Autor.

Tabela 51: Teste de Tukey – Res. Comp. Diam. – Brita 0 – Traço 1:6,5

Traço 1:6,5	Média 1	Média 2	Mód da Média	Dif. Sig.
Ref - 5a	1,08	1,05	0,03	N
Ref - 10a	1,08	1,18	0,10	N
Ref - 5s	1,08	1,26	0,19	N
Ref - 10s	1,08	2,16	1,09	S
5a - 10a	1,05	1,18	0,13	N
5a - 5s	1,05	1,26	0,22	N
5a - 10s	1,05	2,16	1,12	S
10a - 5s	1,18	1,26	0,08	N
10a - 10s	1,18	2,16	0,99	S
5s - 10s	1,26	2,16	0,90	S

Fonte: Autor.

Da análise do teste de Tukey é possível verificar que no geral, apenas a adição de 10% de sílica causou diferença significativa nos resultados de compressão diametral.

No traço mais rico, a adição de 10% de areia também resultou em diferença significativa nos resultados de resistência a compressão diametral. Além disso, é possível verificar também que no geral, com maiores adições, a diferença entre as adições de areia e sílica aumenta.

c. ELABORAÇÃO DOS DIAGRAMAS DE DOSAGEM ADAPTADOS

A produção de um diagrama de dosagem adaptado permite facilitar a escolha de um traço a ser utilizado capaz de atender ao coeficiente de permeabilidade mínimo necessário (de acordo com projeto) e ainda capaz de ser utilizado para o tráfego desejado pelo projetista.

No geral, a maioria dos autores que estudam o tema focam na melhoria da resistência mecânica, entretanto, uma vez que o uso do material é limitado a poucos usos, é importante garantir que a sua característica mais importante, a permeabilidade, não seja perdida.

Para a elaboração dos diagramas de dosagem adaptados dos concretos permeáveis produzidos foram utilizados os seguintes parâmetros: resistência a compressão axial, coeficiente de permeabilidade, traço em massa e o consumo de cimento utilizado.

Vale ressaltar que a adição de sílica aumenta substancialmente o custo do traço quando comparado com o valor de areia e esse fator não está incluso na avaliação do custo do traço pelo método do consumo médio de cimento. Os consumos de cimentos são apresentados na Tabela 52.

Tabela 52: Consumo de Cimento por Cada Traço

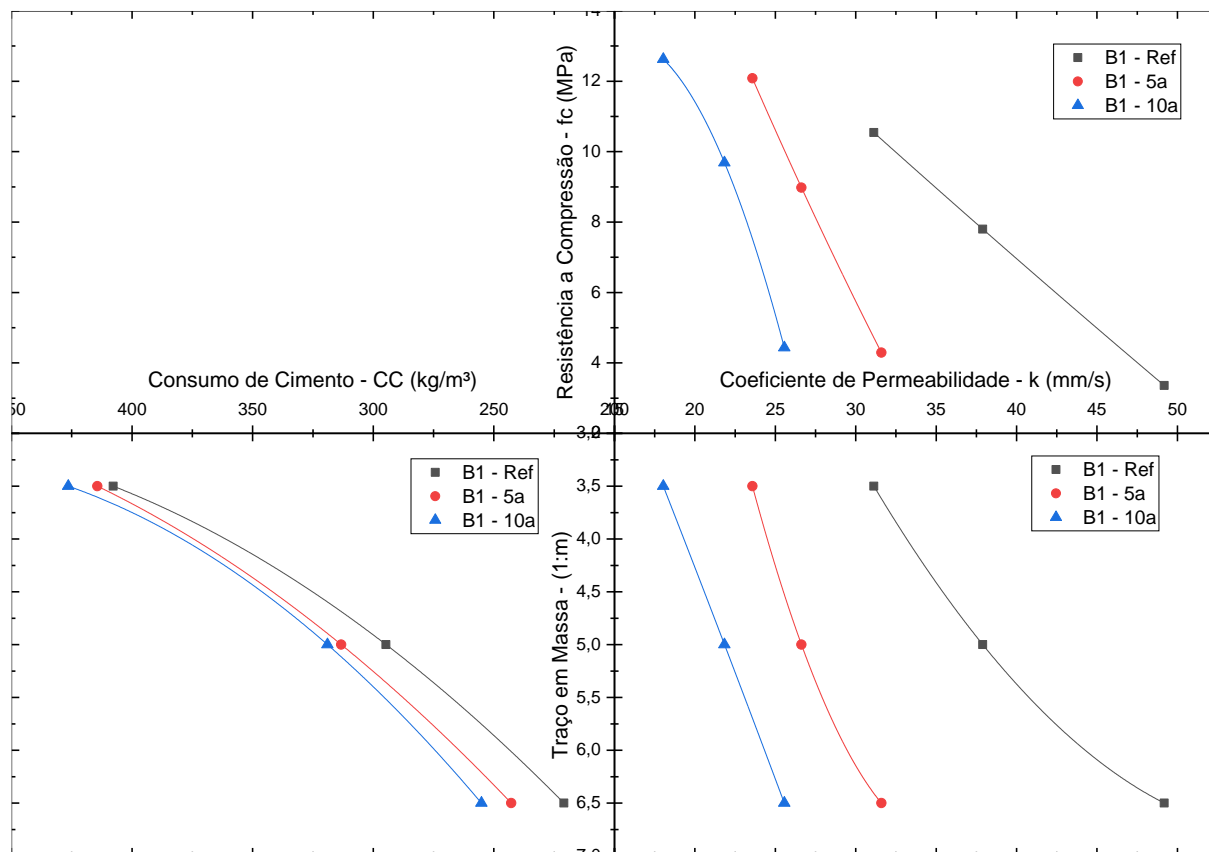
Consumo de Cimento	Forte	Médio	Fraco
Traços (m)	3,50	5,00	6,50
B1 - Ref	407,77	294,70	220,97
B1 - 5a	414,36	313,26	242,80
B1 - 10a	426,39	318,98	255,17
B0 - Ref	410,68	311,52	247,48
B0 - 5a	418,08	321,18	254,67
B0 - 10a	446,04	322,28	254,11
B0 - 5s	420,58	316,27	254,73
B0 - 10s	448,38	332,71	262,29

Fonte: Autor.

Foram produzidos oito diagramas de dosagem: 3 para as misturas com brita 1 (Figura 31) e cinco para as misturas com brita 0 (Figura 32). A partir dos diagramas adaptados é possível selecionar, de acordo com a necessidade, o traço que melhor

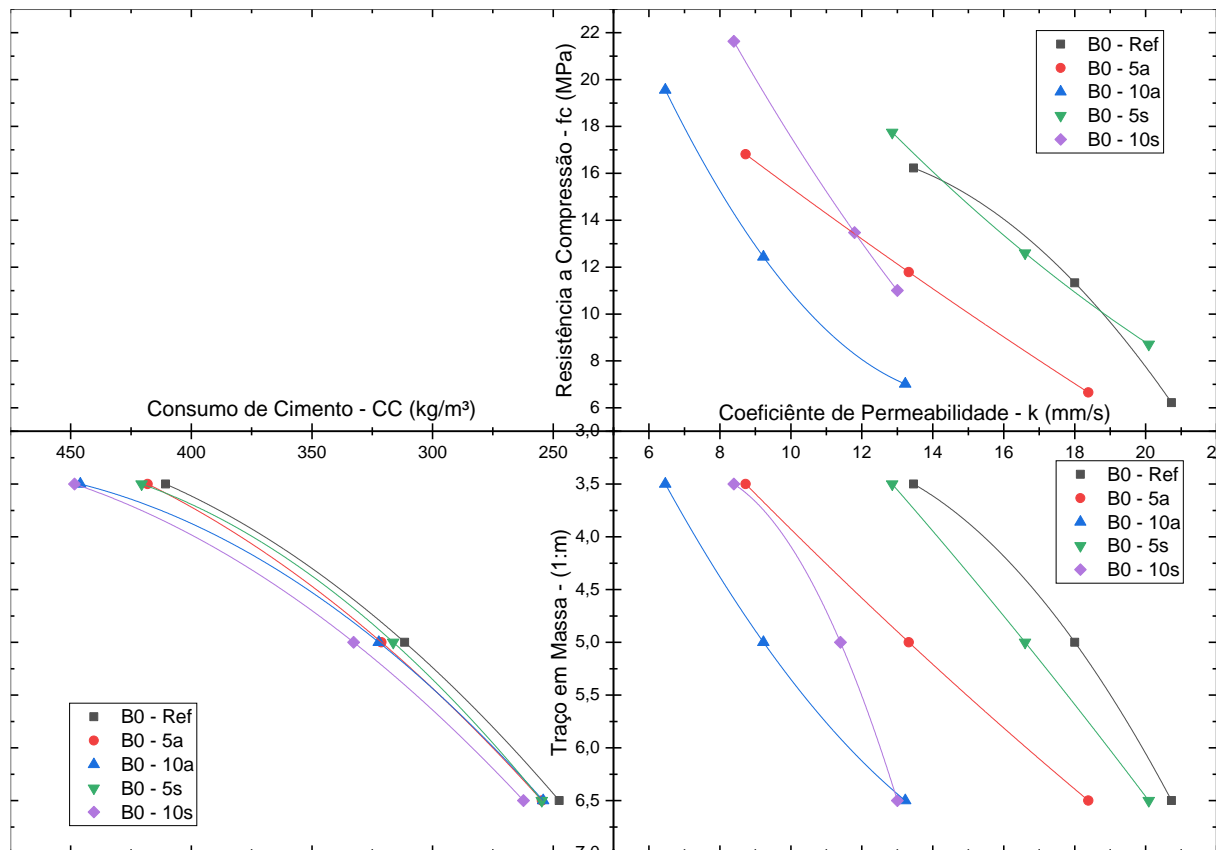
atende aos requisitos de resistência a compressão e ao coeficiente de permeabilidade.

Figura 31: Diagrama de Dosagem – Brita 1



Fonte: Autor.

Figura 32: Diagrama de Dosagem – Brita 0



Fonte: Autor.

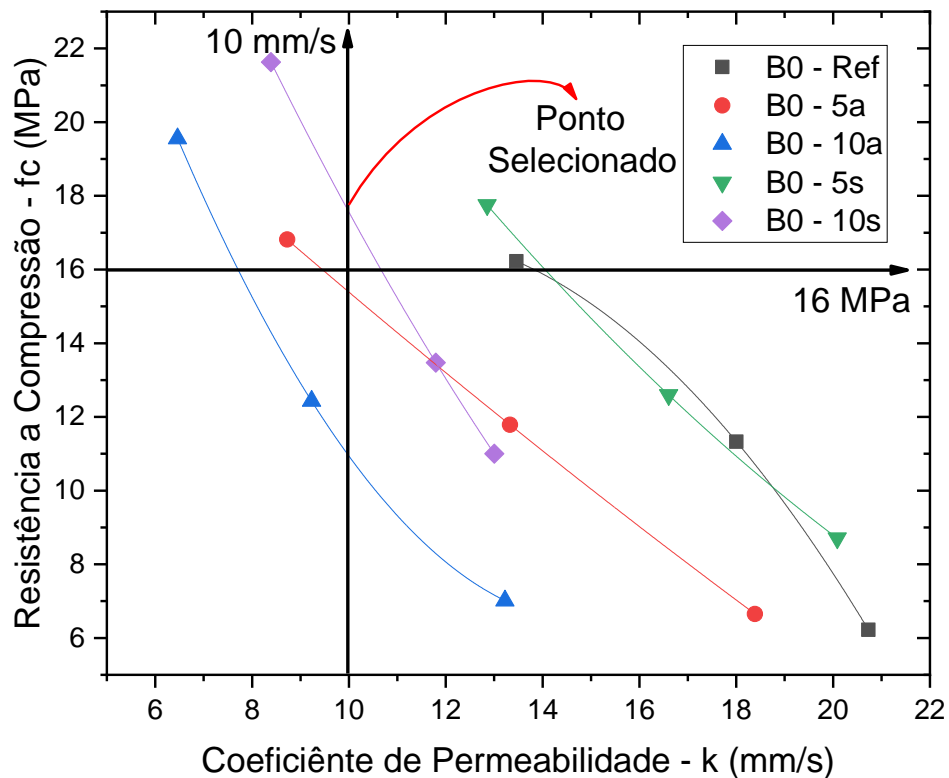
A partir da análise dos diagramas apresentados é possível concluir que a mistura que apresentou os melhores resultados nas 3 composições foi a com 10 % de adição de sílica. Essa mistura apresentou o maior valor de resistência, sem a diminuição do coeficiente de permeabilidade, que foi maior que 8mm/s.

Pela análise dos Testes de Tukey nas características do concreto permeável, no geral, as adições de sílica não causaram diferenças nas características drenantes mais causaram diferenças nas características resistentes.

Nessa mistura foi possível obter resistências mais elevadas sem que fosse perdida a capacidade drenante do concreto. Assim, para demonstração do uso do diagrama, sugere-se um ponto, presente na curva “B0 – 10s”, onde fosse possível obter pelo menos 16MPa de resistência a compressão axial e 10mm/s de coeficiente de permeabilidade (atendendo a norma NBR 16416 (ABNT, 2015) em 10 vezes).

O ponto selecionado está presente na Figura 33 e, a partir dele, poderia ser calculado um concreto poroso que atenderia ao valor estimado de resistência a compressão axial (16MPa), segundo o valor estimado pela equação de Gaedicke *et al.* (2016) a partir do valor de resistência a flexão exigido pelo norma NBR 16416 (ABNT, 2015) e dez vezes o coeficiente de permeabilidade mínimo exigido pela mesma norma.

Figura 33: Seleção de um Ponto no Diagrama de Dosagem

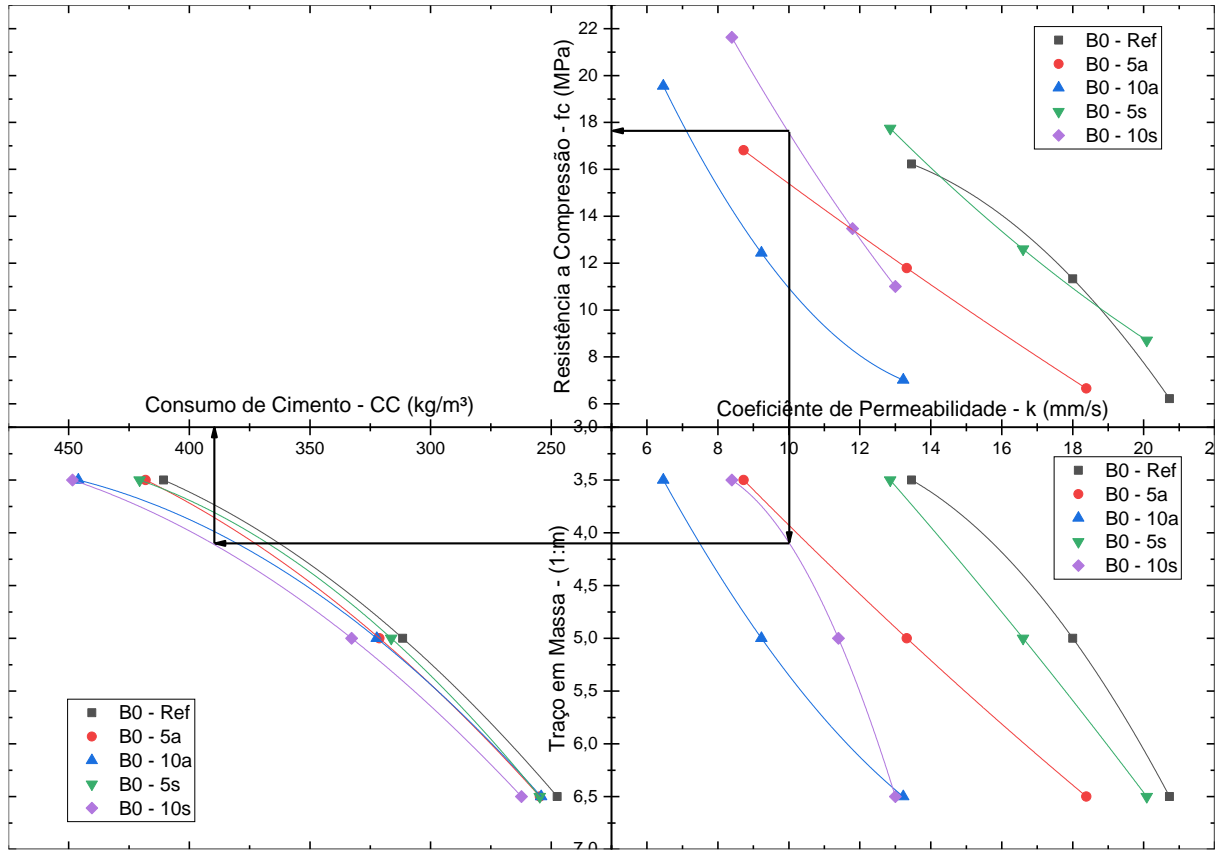


Fonte: Autor.

Traçando-se retas que cortam os eixos a partir do ponto selecionado é possível estimar uma resistência a compressão axial (17,6Mpa), um coeficiente de permeabilidade (10mm/s), um traço em massa (1:4,1) e um consumo de cimento (aproximadamente 390kg/m³).

Esse caminhamento através do diagrama é indicado na Figura 34.

Figura 34: Traço Obtido pelo Ponto Seleccionado



Fonte: Autor.

6. CONCLUSÕES

O programa experimental foi desenvolvido com o objetivo de estudar e verificar a influência de diferentes adições de areia e sílica em concretos permeáveis com diferentes granulometrias de agregado graúdo. Foi analisada a influência desses fatores principalmente no coeficiente de permeabilidade e na resistência mecânica (compressão e tração) do concreto.

Foram produzidos 8 traços em 3 proporções de aglomerante/agregado e foi possível concluir, a partir dos resultados obtidos, que:

- a. Todos os traços produzidos atingiram um coeficiente de permeabilidade que era no mínimo cinco vezes maior que o exigido por norma. Entretanto, nota-se que os traços que foram produzidos com brita do tipo 1 possuíam um índice de vazios relativamente alto, fator esse que causou queda de resistência (nenhum obteve pelo menos 2 MPa estimados de resistência a tração na flexão);
- b. Para os traços de brita 0, o comportamento dos resultados foi semelhante para todas as proporções de mistura. À medida em que foi-se adicionando materiais finos ao concreto, foi-se ganhando resistência, e perdendo-se permeabilidade;
- c. Os resultados de resistência, das misturas com brita 0, foram superiores aos esperados uma vez que foi possível elaborar uma mistura que atendeu nas 3 proporções propostas a exigência a resistência à tração indireta para o uso em pavimentos de veículos leves;
- d. A partir dos limites de resistência a tração na flexão exigidos pela norma de pavimentos permeáveis foi possível estimar, com auxílio da bibliografia, valores de resistência a compressão axial correspondentes que foram utilizados para análise das misturas e dos traços;
- e. Em relação ao uso do diagrama adaptado, sugeriu-se uma mistura com brita 0 e 10% de adição de sílica pois foi a mistura que apresentou, nas três proporções, valores que atendiam ao requisitado pela norma para

o seu uso em pavimentos, com coeficiente de permeabilidade adequado.

- f. Foi possível também estimar por meio da bibliografia que todos os traços ricos que continham brita 0 atendem ao requisito da norma brasileira para pavimentos permeáveis para veículo leves e que todos os traços médios atendem ao uso para pedestres.
- g. Por fim, a adição da sílica, mesmo na proporção de 5% no traço pobre foi capaz de produzir uma mistura que atende ao mínimo de resistência a tração na flexão exigido por norma para o uso de pedestres.



REFERÊNCIAS

- ABADEL, A.; ABBAS, H.; ALRSHOUDI, F.; et al. Experimental and analytical investigation of fiber alignment on fracture properties of concrete. **Structures**, Oxford, v. 28, p. 2572–2581, 2020.
- ADIL, G.; KEVERN, J. T.; MANN, D. Influence of silica fume on mechanical and durability of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 247, p. 118453, 2020.
- AGAR-OZBEK, A. S.; WEERHEIJM, J.; SCHLANGEN, E.; VAN BREUGEL, K. Investigating porous concrete with improved strength: Testing at different scales. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 41, p. 480–490, 2013.
- ALI, B.; QURESHI, L. A.; KHAN, S. U. Flexural behavior of glass fiber-reinforced recycled aggregate concrete and its impact on the cost and carbon footprint of concrete pavement. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 262, p. 120820, 2020.
- ALSHAREEDAH, O.; NASSIRI, S.; CHEN, Z.; et al. Field performance evaluation of pervious concrete pavement reinforced with novel discrete reinforcement. **Case Studies in Construction Materials**, Amsterdam, v. 10, p. e00231, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11768: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland Parte 1: Requisitos**. Rio de Janeiro, 2019. 27 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11768: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland Parte 2: Ensaios de desempenho**. Rio de Janeiro, 2019. 9 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11768: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland Parte 3: Ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro, 2019. 16 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13956: Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta Parte 1: Requisitos**. Rio de Janeiro, 2012. 6 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13956: Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta Parte 2: Ensaios Químicos**. Rio de Janeiro, 2012. 9 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13956: Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta Parte 3: Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 7 dias**. Rio de Janeiro, 2012. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13956: Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta Parte 4: Determination of fineness by the 45 µm test sieve.** Rio de Janeiro, 2012. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15140: Misturas asfálticas — Determinação da perda de massa por abrasão cântabro.** Rio de Janeiro, 2014. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16416: Pavimentos permeáveis de concreto - Requisitos e procedimentos.** Rio de Janeiro, 2015. 25 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro, 2017. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos.** Rio de Janeiro, 2018. 12 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16886: Concreto — Amostragem de concreto fresco.** Rio de Janeiro, 2020. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16889: Concreto — Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.** Rio de Janeiro, 2020. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.** Rio de Janeiro, 2015. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2018. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211: Agregados para concreto - Especificação.** Rio de Janeiro, 2009. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222: Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2011. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7680-1: Concreto - Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto Parte 1: Resistência à compressão axial.** Rio de Janeiro, 2015. 27 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7680-2: Concreto - Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto Parte 2: Resistência à tração na flexão.** Rio de Janeiro, 2015. 7 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953: Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência.** Rio de Janeiro, 2015. 3 p.

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, 2005. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 7500-1: Materiais metálicos - Calibração e verificação de máquinas de ensaio estático uniaxial Parte 1: Máquinas de ensaio de tração/ compressão - Calibração e verificação do sistema de medição da força.** Rio de Janeiro, 2016. 19 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 30: Agregado miúdo - Determinação da absorção de água.** Rio de Janeiro, 2001. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 51: Agregado graúdo - Ensaio de abrasão "Los Angeles".** Rio de Janeiro, 2011. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente.** Rio de Janeiro, 2009. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água.** Rio de Janeiro, 2009. 8 p.

BATEZINI, R. **Estudo preliminar de concretos permeáveis como revestimento de pavimentos para áreas de veículos leves.** São Paulo: Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da Universidade de São Paulo, 2012. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-19072013-155819/>. Acesso em: 18 nov. 2020.

BATEZINI, R. **Estudo das características hidráulicas e mecânicas de calçadas em concreto permeável em pista experimental.** São Paulo: Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da Universidade de São Paulo, 2019. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-28082019-113411/>. Acesso em: 18 nov. 2020.

BATEZINI, R.; BALBO, J. T. Study on the hydraulic conductivity by constant and falling head methods for pervious concrete. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, [s. l.], v. 8, n. 3, p. 248–259, 2015. FapUNIFESP (SciELO). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S1983-41952015000300002>. Acesso em: 22 dez. 2020.

BHUTTA, M. A. R.; TSURUTA, K.; MIRZA, J. Evaluation of high-performance porous concrete properties. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 31, p. 67–73, 2012.

BOLOOKI POORSAHELI, H.; BEHRAVAN, A.; TABATABAEI AGHDA, S. T. Durability performance of hybrid reinforced concretes (steel fiber + polyolefin fiber) in a harsh marine tidal zone of Persian Gulf. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 266, p. 121176, 2021.

BRASWELL, A.; ANDERSON, A.; HUNT, W. Hydrologic and Water Quality Evaluation of a Permeable Pavement and Biofiltration Device in Series. **Water**, London, v. 10, n. 1, p. 33, 2018. MDPI AG. Disponível em: <http://www.mdpi.com/2073-4441/10/1/33>. Acesso em: 18 nov. 2020.

CHAITANYA, M.; RAMAKRISHNA, G. **Enhancing the mechanical properties of pervious recycled aggregate concrete using silicafumes**. Amsterdam: Elsevier, 2020. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S221478532039218X>. Acesso em: 5 jan. 2021.

CHANDRAPPA, A. K.; BILIGIRI, K. P. Flexural-fatigue characteristics of pervious concrete: Statistical distributions and model development. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 153, p. 1–15, 2017.

CHANDRAPPA, ANUSH K; BILIGIRI, KRISHNA PRAPOORNA; CHANDRAPPA, A K; BILIGIRI, K P. Investigation on Flexural Strength and Stiffness of Pervious Concrete for Pavement Applications Reference "Investigation on Flexural Strength and Stiffness of Pervious Concrete for Pavement Advances in Civil Engineering Materials. **Advances in Civil Engineering Materials**, West Conshohocken, v. 7, n. 2, p. 223–242, 2018.

CHHORN, C.; HONG, S. J.; LEE, S. W. Relationship between compressive and tensile strengths of roller-compacted concrete. **Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)**, Beijing, v. 5, n. 3, p. 215–223, 2018.

CHRISTOFIDIS, D.; ASSUMPÇÃO, R. DOS S. F. V.; KLIGERMAN, D. C. A evolução histórica da drenagem urbana: da drenagem tradicional à sintonia com a natureza. **Saúde em Debate**, Rio de Janeiro, v. 43, n. spe3, p. 94–108, 2019. FapUNIFESP (SciELO). Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-11042019000700094&lng=en&nrm=iso&tlng=pt. Acesso em: 18 nov. 2020.

CHU, L.; FWA, T. F.; TAN, K. H. Laboratory evaluation of sound absorption characteristics of pervious concrete pavement materials. **Transportation Research Record**, Thousand Oaks, v. 2629, n. 1, p. 91–103, 2017.

ELANGO, K. S.; GOPI, R.; SARAVANAKUMAR, R.; et al. **Properties of pervious concrete: a state of the art review**. Amsterdam: Elsevier, 2020. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214785320384765>. Acesso em: 2 jan. 2021.

GAEDICKE, C.; TORRES, A.; HUYNH, K. C. T.; MARINES, A. A method to correlate splitting tensile strength and compressive strength of pervious concrete cylinders and cores. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 125, p. 271–278, 2016.

GAROZI, R.; SILVA, D. A. **Estudo de Concreto Permeável como Pavimento**. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2019.

GRUBEŠA, I. N.; BARIŠIĆ, I.; DUCMAN, V.; KORAT, L. Draining capability of single-sized pervious concrete. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 169, p. 252–260, 2018.

HAMMES, G.; THIVES, L. P.; GHISI, E. Application of stormwater collected from porous asphalt pavements for non-potable uses in buildings. **Journal of Environmental Management**, Amsterdam, v. 222, p. 338–347, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.05.094>>. Acesso em: 18/11/2020.

HELENE, P.; TUTIKIAN, B. F. **Dosagem dos Concretos de Cimento Portland 12.1 Introdução e Importância do Tema**. 2011.

HESAMI, S.; AHMADI, S.; NEMATZADEH, M. Effects of rice husk ash and fiber on mechanical properties of pervious concrete pavement. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 53, p. 680–691, 2014.

HUANG, J.; LUO, Z.; KHAN, M. B. E. Impact of aggregate type and size and mineral admixtures on the properties of pervious concrete: An experimental investigation. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 265, p. 120759, 2020.

HUSSAIN, I.; ALI, B.; AKHTAR, T.; JAMEEL, M. S.; RAZA, S. S. Comparison of mechanical properties of concrete and design thickness of pavement with different types of fiber-reinforcements (steel, glass, and polypropylene). **Case Studies in Construction Materials**, Amsterdam, v. 13, p. e00429, 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Pesquisa Nacional de Amostra de Domicílios (PNAD)**. [S. l.: s. n.], 2015. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/pt/inicio.html>. Acesso em: 19 nov. 2020.

IBRAHIM, A.; MAHMOUD, E.; YAMIN, M.; PATIBANDLA, V. C. Experimental study on Portland cement pervious concrete mechanical and hydrological properties. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 50, p. 524–529, 2014.

INSTITUTO PAULO FREIRE. **Pesquisa, documentação e Informação**. [S. l.: s. n.], 2021. Disponível em: https://www.paulofreire.org/portfolio/pesquisa_documentacao_e_informacao.html. Acesso em: 05 jan. 2021.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 17785-1 - Testing methods for pervious concrete – Part 1: Infiltration rate**. 2016. 9 p.

KIA, A.; WONG, H. S.; CHEESEMAN, C. R. Clogging in permeable concrete: A review. **Journal of Environmental Management**, 15. maio 2017. Academic Press.

LAHUCIK, J.; DAHAL, S.; ROESLER, J.; AMIRKHANIAN, A. N. Mechanical properties of roller-compacted concrete with macro-fibers. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 135, p. 440–446, 2017.

LI, H.; HARVEY, J. T.; HOLLAND, T. J.; KAYHANIAN, M. The use of reflective and permeable pavements as a potential practice for heat island mitigation and stormwater management. **Environmental Research Letters**, Bristol, v. 8, n. 1, 2013.

LI, J.; ZHANG, Y.; LIU, G.; PENG, X. Preparation and performance evaluation of an innovative pervious concrete pavement. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 138, p. 479–485, 2017. Elsevier Ltd.

LOPES, W. G. R.; LIMA JÚNIOR, J. M.; MATOS, K. C. Impactos do crescimento de áreas impermeáveis e o uso de medidas alternativas para a drenagem urbana. **Research, Society and Development**, Itabira, v. 9, n. 9, p. e213997102, 2020. Research, Society and Development. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v9i9.7102>. Acesso em: 18 nov. 2020.

HELENE, P.R.L.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: Pini, 1992.

MARTINS VAZ, I. C.; GHISI, E.; THIVES, L. P. Life cycle energy assessment and economic feasibility of stormwater harvested from pervious pavements. **Water Research**, Oxford, v. 170, p. 115322, 2020.

MOHAMMED, B. S.; LIEW, M. S.; ALALOUL, W. S.; et al. Properties of nano-silica modified pervious concrete. **Case Studies in Construction Materials**, Amsterdam, v. 8, p. 409–422, 2018. Elsevier Ltd.

MUTHUKUMAR, S.; JAI SARAVANAN, A.; RAMAN, A.; SHANMUGA SUNDARAM, M.; SRI ANGAMUTHU, S. **Investigation on the mechanical properties of eco-friendly pervious concrete**. Amsterdam: Elsevier, 2020.

NHAT HO TRAN, T.; PUTTIWONGRAK, A.; PONGSOPHA, P.; et al. Microparticle filtration ability of pervious concrete mixed with recycled synthetic fibers. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 270, p. 121807, 2021.

NIEUWENHUIS, E.; CUPPEN, E.; LANGEVELD, J.; DE BRUIJN, H. Towards the integrated management of urban water systems: Conceptualizing integration and its uncertainties. **Journal of Cleaner Production**, v. 280, p. 124977, 2020.

DE OLIVEIRA, B.; RICCI, L.; PEREIRA, A. M.; AKASAKI, J. L. **Estudo de dosagens visando obter concretos para obras de pequeno porte**. [S. l.: s. n.], 2020.

OWENS CORNING. **Composites Owens Corning**. [S. l.: s. n.], 2020. Disponível em: <https://www.owenscorning.com/en-us/composites/products>. Acesso em: 21 dez. 2020.

PUTMAN, B. J.; NEPTUNE, A. I. Comparison of test specimen preparation techniques for pervious concrete pavements. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 25, n. 8, p. 3480–3485, 2011.

SABOO, N.; SHIVHARE, S.; KORI, K. K.; CHANDRAPPA, A. K. Effect of fly ash and metakaolin on pervious concrete properties. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 223, p. 322-328, 2019.

SELBIG, W. R.; BUER, N.; DANZ, M. E. Stormwater-quality performance of lined permeable pavement systems. **Journal of Environmental Management**, Amsterdam, v. 251, p. 109510, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109510>. Acesso em: 18 nov. 2020.

SINGH, A.; SAMPATH, P. V.; BILIGIRI, K. P. A review of sustainable pervious concrete systems: Emphasis on clogging, material characterization, and environmental aspects. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 261, p. 120491, 2020.

SUDA, V. B. R.; SUTRADHAR, R. **Strength characteristics of micronized silica concrete with polyester fibres**. Amsterdam: Elsevier, 2020.

SUMANASOORIYA, M. S.; NEITHALATH, N. Pore structure features of pervious concretes proportioned for desired porosities and their performance prediction. **Cement and Concrete Composites**, Oxford, v. 33, n. 8, p. 778–787, 2011. Elsevier.

TECNOSIL. **Concreto Permeável: O que é e quais seus grandes atrativos?** [S. l.: s. n.], 2020. Disponível em: <https://www.tecnosilbr.com.br/concreto-permeavel-o-que-e-e-quais-seus-grandes-atrativos/> Acesso em: 04 jan. 2021.

TECNOSIL. **Sílica ativa**. [S. l.: s. n.], 2020. Disponível em: <https://www.tecnosilbr.com.br/silica-ativa/>. Acesso em: 21 dez. 2020.

TEIXEIRA, G. DA S.; RODRIGUES, R. S. S.; CRISPIM, D. L.; FERNANDES, L. L.; BITTENCOURT, G. M. Metodologias para Caracterização e Avaliação de Sistemas de Drenagem urbana: uma revisão. **Research, Society and Development**, Itabira, v. 9, n. 4, p. e197943063, 2020. Research, Society and Development. Disponível em: <http://orcid.org/0000-0003-1758-4172>. Acesso em: 18 nov. 2020.

Tennis, Paul, D.; Leming, Michael, L.; and Akers, David, J. **Pervious Concrete Pavements**. Portland Cement Association, Skokie, Illinois, and National Ready Mixed Concrete Association, Silver Spring, Maryland, USA, 2004, 36 pages.

TOGHROLI, A.; MEHRABI, P.; SHARIATI, M.; et al. Evaluating the use of recycled concrete aggregate and pozzolanic additives in fiber-reinforced pervious concrete with industrial and recycled fibers. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 252, p. 118997, 2020.

TORRI. **Início Torri**. [S. l.: s. n.], 2020. Disponível em: <http://www.torri.com.br/>. Acesso em: 21 dez. 2020.

VOTORANTIM. **Cimento todas as obras**: mapa da obra. Disponível em: <https://www.votorantimcimentos.com.br/produtos/cimentos-itau/todas-as-obras-4/>. Acesso em: 20 dez. 2020.

XIE, N.; AKIN, M.; SHI, X. Permeable concrete pavements: A review of environmental benefits and durability. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 2010, p. 1605-1621, 2019.

XU, W.; CHEN, B.; CHEN, X.; CHEN, C. Influence of aggregate size and notch depth ratio on fracture performance of steel slag pervious concrete. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 273, p. 122036, 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095006182034040X>. Acesso em: 5 jan. 2021.

YAHIA, A.; KABAGIRE, K. D. **New approach to proportion pervious concrete**. Amsterdam: Elsevier, 2014..

YU, F.; SUN, D.; WANG, J.; HU, M. Influence of aggregate size on compressive strength of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 209, p. 463–475, 2019.

ZANANDREA, F.; DA SILVEIRA, A. L. L. Use of low impact development techniques to control hydrological impacts. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 6, p. 1195–1208, 2019. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-41522019000601195&lng=en&nrm=iso&tlng=pt. Acesso em: 18 nov. 2020.

ZHONG, R.; LENG, Z.; POON, C. SUN. Research and application of pervious concrete as a sustainable pavement material: A state-of-the-art and state-of-the-practice review. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 183, p. 544-553, 2018.